

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikka

Elektroniikkasuunnittelu

2011

Joonas Naumanen

ISOLOITU VIRRAN- JA JÄNNITTEENMITTAUSMODUULI



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Joonas Naumanen

ISOLOITU VIRRAN- JA JÄNNITTEENMITTAUSMODUULI

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa mittausselostin galvaanisesti erotettu virran- ja jännitteenmittausmoduuli akku- tai muuhun sähkölinjaan. Moduulista tuli saada virta- ja jännitetiedot ulos yksipuolisena analogisena 0...3,3V jännitteenä, joka voidaan lukea ja tulkita ulkoisella mittalaitteella. Työn tilanteen yrityksen taholta moduuliin liittyi vaatimus liittää siihen erillinen laajennuskortti, jonka avulla moduulista saisi mittaustiedot ulos suoraan digitaalisessa muodossa.

Mittausmoduulin keskeisimmät ominaisuudet olivat hyvä erotus mitattavasta linjasta sekä laaja käyttöjännitealue, koska laitteen vaatimuksiin kuului mahdollisuus ottaa käyttöjännite suoraan mitattavasta linjasta. Virran mittauksen suunnittelun lähtökohtana oli hyödyntää Hall-anturia, jolla voidaan saavuttaa hyvä galvaaninen erotus mitattavasta linjasta. Jännitteenmittauksessa tuli myös käyttää isoivaa vahvistinpiiriä erottamaan mitattava linja tältäkin osin muusta piiristä. Laaja käyttöjännitealue mahdollistettiin käyttämällä moduulin virransyötössä pientä step down -hakkuripiiriä.

Työssä tutkittiin miten tämän tyyppinen virranmittausmenetelmä sopii virran ja jännitteen mittaamiseen erilaisissa kohteissa, pääasiassa akku- tai muissa tasavirtasyöteissä. Tarkastelun alla olivat avoimen silmukan Hall-anturiperiaatteeseen perustuvan mittauksen tarkkuus, lineaarisuus ja mahdollinen häiriöherkkyys sekä moduulin yleinen toimintakyky eri olosuhteissa. Piirilevyn suunnittelussa pyrittiin minimoimaan mahdollisia hakkuripiirien aiheuttamia häiriöitä. Piirilevyä suunniteltaessa pyrittiin ottamaan huomioon myös valmistettavuus siltä varalta, että laitetta tulisi jatkossa käyttää useammassa yhteyksissä.

Lopputuloksena laitteesta saatiin toimiva, mutta mittauksen havaittiin olevan suhteellisen herkkä ulkoisille häiriöille, pääasiassa lämpötilan vaihteluille sekä ulkoisten magneettikenttien vaikutukselle. Mittauksen herkkyys todettiin riittäväksi esimerkiksi tehonsyöttölinjan valvontaan tai muuhun vähemmän tarkkuutta vaativaan yleiskäyttöön, mutta takkoihin virransäätökohteisiin sovellettuna tekniikka vaatisi vielä jatkokehitystä.

ASIASANAT:

Hall-anturi, akku, laturi, sähkölinja, virtamittari, isolointi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Electronics Design

June 2011 | 41 pages

Instructors: Timo Tolmunen, D.Sc. (Tech.), Mikko Naatula, B.Eng.

Joonas Naumanen

AN ISOLATED CURRENT AND VOLTAGE MEASURING MODULE

The purpose of this thesis was to design, build and test a galvanically isolated current and voltage measuring module for a DC power line. Current and voltage information from the power line should be output as a single-ended analog 0...3.3 V voltage, which could be measured with external equipment. The module had to support connection to an extension card, with which the module would gain an additional digital interface.

The key features of the module were good isolation from the measured line and a wide operating voltage range, because the module had to have the option to be powered straight from the measured power line. Starting point for designing the current measuring circuitry was to use a current transducer IC based on Hall-effect principle. Voltage measurement would be isolated from the measured line by using an isolation amplifier. The wide power supply range of the module was achieved by using a simple switch mode buck regulator, which accepts input voltages up to 75V.

The accuracy, linearity and immunity to external interference using an open loop Hall effect sensor in current measurements in battery power line applications were studied. The behavior of the module was tested in different conditions. Proper PCB design techniques were applied to minimize interference from the switch mode power supply circuits to output signals, and the possibility of small-scale production of the module was kept in mind.

The result of this thesis was a functional device, but which was relatively sensitive to varying operating conditions, mainly for the Earth's magnetic field and ambient temperature. The sensitivity and accuracy of measurements were considered to be good enough for current monitoring or other non-critical applications. Applying this measuring technique to more precise control applications would require further development.

KEYWORDS:

Hall effect, battery, charger, power line, current meter, isolation

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	6
2 VAATIMUKSET	3
2.1 Akkulinja	3
2.2 Lohkokaavio ja valitut komponentit	3
2.2.1 Hall-mittapiiri	4
2.2.2 Isolointivahvistin	5
3 MODUULIN SUUNNITTELU JA MITOITUS	8
3.1 LEM Minisens	8
3.2 Puskurivahvistinkytkenät	9
3.3 Käyttöjännitehakkurin kytkentä	11
3.4 Piirilevy	14
4 HALL-ILMIÖ JA HALL-ANTURIT	16
4.1 Hall-anturin toimintaperiaate	16
4.2 Edut ja haitat muihin tekniikoihin nähden	20
5 MODUULIN RAKENTAMINEN JA TESTAUS	22
5.1 Testausympäristö ja -laitteisto	22
5.2 Agilent-tiedonkeruulaite	23
6 LOPPUTULOKSET JA JATKOKEHITYS	25
6.1 Jännitteen mitta	25
6.2 Virran mitta	28
7 YHTEENVETO	35
LÄHTEET	36
LIITTEET	37

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

B	Magneettivuon tiheys
C	Kapasitanssi
G	Vahvistus
H	Magneettikentän voimakkuus
I	Virta
L	Induktanssi
R	Resistanssi
T	Tesla
U	Jännite
f	Taajuus
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti
I/O	Tulot ja lähdöt, Input/Output
CAN	CAN-tiedonsiirtoväylä
ESR	kondensaattorin sarjaresistanssi (Equivalent Series Resistance)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse Width Modulation)
SMD	Pintaliitoskomponentti (Surface Mount Device)
VEE	Agilentin visuaalinen mittausten ohjelmointiympäristö (Visual Engineering Environment)

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella, rakentaa ja testata isoitu virran- ja jännittemittausmoduuli työn tilanteelle yritykselle. Työssä tutkittiin uudenlaisen virranmittausmenetelmän soveltuvuutta yrityksen sovelluksiin. Kirjallisuutta virranmittaukseen sovelletusta Hall-ilmion hyväksikäytöstä on tällä hetkellä saatavilla varsin rajoitetusti. Useimmat tässä työssä käytetyt lähteet olivat komponenttivalmistajien omia julkaisuja ja suunnitteluoppaita.

Virran mittaamiseksi siirtolinjasta on käytössä muutamia eri menetelmiä. Yleisin näistä on yksinkertaisen, resistanssiltaan pienen sarjavastuksen käyttö mitattavassa linjassa, jolloin sarjavastuksen yli oleva jännite muuttuu linjassa kulkevan virran funktiona. Tämä menetelmä on halpa ja helppo toteuttaa, sillä saadaan tarkkoja mittaustuloksia, ja se onkin parhaiten toimiva vaihtoehto pienitehoisissa sovelluksissa. Suurempia virtoja ja jännitteitä mitattaessa tämän tekniikan huonot puolet tulevat kuitenkin esille: mittavastus kuluttaa aina tehoa sekä lämpenee, lisäksi mittavastuksella ei saada galvaanista erotusta mitattavasta linjasta ilman lisäkytkentöjä.

Galvaanisen erotuksen aikaansaamiseksi mitattavasta linjasta voidaan hyödyntää muun muassa erilaisia virtamuuntajia. Suurten virtojen mittaamisessa hyödynnetään usein suljetun silmukan virtamittausmuuntajaa, joka mahdollistaa yksinkertaisen galvaanisen erotuksen mitattavasta linjasta. Mittausmuuntajan muita hyviä puolia ovat yksinkertaisuus ja passiivisuus, mikä tekee mittaukseen liittyvän elektroniikan suunnittelusta helppoa. Mittausmuuntaja kuluttaa kuitenkin jonkin verran tehoa, ja kaikissa tapauksissa mitattavaa linjaa ei voida ympäröidä suljetulla mittaussilmukalla.

Avoimeen silmukkaan perustuva virran mittaus voidaan toteuttaa Hall-periaatteella toimivalla mittapiirillä mitattavan linjan läheisyydestä. Virtaa voidaan mitata esimerkiksi piirilevyn pinnalla kulkevasta johtimesta, jonka päälle mittapiiri on sijoitettuna, jolloin mitattavaan linjaan ei tarvita galvaanista yhteyttä. Mitattavassa johtimessa kulkeva virta havaitaan mitattavan virran aiheuttaman magneettikentän perusteella, jolloin

mittauskesta saadaan vähän tehoa kuluttava ja turvallinen suurillakin virroilla. Mittaustarkkuus ja -herkkyys eivät tässä tekniikassa yllä aivan sarjavastuksen tai mittamuuntajan tasolle, mutta näihin seikkoihin voidaan vaikuttaa piirilevyn suunnittelulla sekä instrumentointikytkennoillä. Hall-periaatteella toimivat anturit soveltuvat parhaiten suurivirtaisiin sovelluksiin, joissa hyvä galvaaninen erotus mitattavasta linjasta sekä yksinkertainen toteutus muun mittauselektroniikan suhteen ovat toivottuja ominaisuuksia.

2 VAATIMUKSET

Tässä työssä suunnitellulla ja rakennetulla mittausmoduulilla oli kyettävä mittaamaan sekä virtaa että jännitettä tehonsyöttölinjasta, jonka jännite ja virta voivat vaihdella laajalla alueella. Virta- ja jännitetiedot tuli saada moduulista ulos analogisena 0...3,3 V:n jännitteenä, jonka lisäksi moduulissa tuli olla liitäntä yrityksen valmiisiin laajennuskortteihin. Laitetta oli tarkoitus käyttää aluksi vain laboratorio- ja testikäytössä, mutta sitä oli tarkoitus hyödyntää mahdollisuuksien mukaan myös muissa kohteissa.

2.1 Akkulinja

Laitteen vaatimuksiin kuului mahdollisuus käyttää sitä akkulinjassa, jossa kulkisi korkeintaan 40 A:n virta ja jonka jännite voisi olla 0...72 V. Moduulin käyttöjännitteen tuli olla otettavissa mitattavasta linjasta siinä tapauksessa, että mitattavan linjan jännite on 10...72 V. Tämä vaati moduulin tehonsyöttöpuolelle erillisen pienitehoisen hakkurikytkennän, jolla moduulille saatiin luotua +5 V:n käyttöjännite suurestakin sisääntulojännitteestä.

Myöhemmin vaatimuksiin lisättiin mahdollisuus tulevaisuudessa kytkeä mittauslinjaan jopa 400 V:n akku. Tässä tapauksessa moduulin käyttöjännite oli joka tapauksessa tuotava ulkoisesta lähteestä, ja galvaaninen yhteys mittauslinjasta tehonsyöttöpiirille oli voitava katkaista helposti jo mahdollisimman läheltä mitattavaa linjaa riittävän eristyksen takaamiseksi.

2.2 Lohkokaavio ja valitut komponentit

Tärkeimmät komponentit, LEMin mittauspiiri ja Avagon isolointivahvistin oli valittu työn tilanneen yrityksen taholta jo ennen työn aloittamista. Myös isolointivahvistimen tarvitsemaa isoloitua käyttöjännitettä varten yrityksen arkistoissa oli monessa yhteydessä käytetty ja toimivaksi osoittautunut gate driver -tyylinen hakkurikytkentä, jolla luotiin galvaanisesti erotettu käyttöjännite isolointivahvistimen ensiöpuolelle. Kuvassa 1 näkyy työn pohjana ollut lohkokaavio.

Kuvassa 1 oikealla kulkevat paksummat viivat kuvaavat mitattavaa tehonsyöttölinjaa. Linjasta jännitesisäätuloon menevä yhteys voidaan tarvittaessa katkaista piirilevyltä.

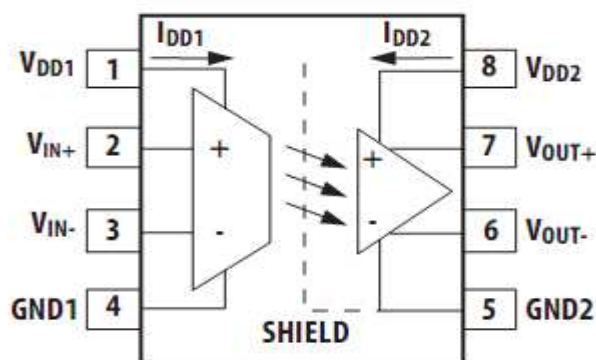
Työssä käytetty LEM:in (Liaisons Electroniques-Mécaniques) valmistama FHS 40-P/SP600 Minisens -mittapiiri on virran mittaamiseen tarkoitettu isoiloiva Hall-periaatteeseen perustuva anturiipiiri [3]. Piiri havaitsee piirilevyllä olevassa vedossa kulkevan virran aiheuttaman magneettikentän voimakkuuden ja muuntaa magneettikentän voimakkuuden jännitteeksi. Jos virta on kaksisuuntainen, Minisens reagoi magneettikentän polaarisuuteen ja antaa ulostuloonsa joko positiivisen tai negatiivisen jännitteen suhteessa 2,5 V:n referenssijännitteeseen. Maksimissaan ulostuleva jännite piirillä on 4,5 V suhteessa piirin maatasoon.

TURUN AMK:N OPINNÄYTETYÖ | Joonas Naumanen

mittausalueesta saatiin näin vaatimukset täyttävä. Minisens-piirin datalehden mukaan tällä järjestelyllä virranmittausalue saataisiin ulottumaan aina 55 A:iin asti.

2.2.2 Isolointivahvistin

Avago ACPL-C97B-isolointivahvistin on isoituun jännitteen ja virran mittaukseen tarkoitettu vahvistinpiiri. Piiristä on eri malleja, joista tähän työhön valittiin niistä epätarkin, jonka vahvistuksen toleranssi on $\pm 3\%$. Piirille luvataan yli 1 kV:n eristyskyky, joka riitti tässä yhteydessä hyvin. Piirillä on differentiaaliset tulo- ja lähtöliitännät, ja se toimii 3,3...5,0 V:n käyttöjännitteellä, joten piirin toisiopuolen käyttöjännitteenä voidaan käyttää samaa reguloitua +5 V:n jännitettä kuin muillekin kytkennän piireille. Tulojännitealue piirillä on -0,3...0,3 V, joka saadaan skaalattua mitattavasta linjasta yksinkertaisella vastusjaolla. Piirin vahvistus on 8,2 ja differentiaalinen lähtöjännite vaihtelee välillä 0...2,5 V. Kuvassa 2 näkyy piirin signaali- ja käyttöjännitenastat.



Kuva 2. Avago ACPL-C79B-isolointivahvistin [8]

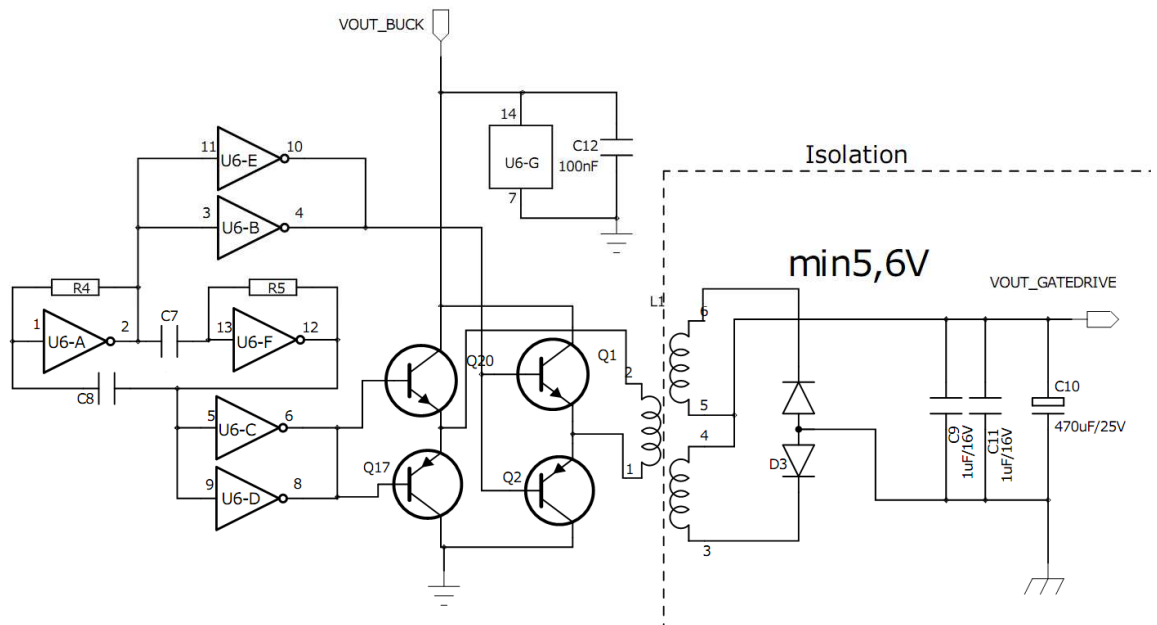
2.2.3 Käyttöjännitteen hakkurikytkentä

Laajan käyttöjännitealuevaatimuksen vuoksi moduuliin etsittiin pieni ja mahdollisimman yksinkertainen step down -hakkuripiiri, joita on tarjolla useilla valmistajilla. Päälimmäisinä vaatimuksina olivat 72 V:iin ulottuva sisääntulojännitealue sekä vähintään noin 8,2 V:n ulostulojännite 10 V:n sisääntulojännitteellä. Hakkurin tuli antaa moduulille virtaa minimissään ja maksimissaan vain muutamia kymmeniä milliampeereita. Kytkennän ulkoinen koko sekä suunnittelun vaiva haluttiin pitää mahdollisimman pieninä.

Hakkuripiiriksi valittiin tarkan pohdinnan jälkeen National Semiconductorsin valmistama LM5574-piiri, joka toimii yksinkertaisena jännitettä laskevana katkojana [2]. Sisääntulojännite piirillä on maksimissaan 75 V ja virtaa saadaan ulos aina 500 mA:iin asti, eikä piiri vaadi ulkoista kytkintransistoria toisin kuin suuremmille virroille suunnitellut piirit. Ulkoiset komponentit olivat kytkentään helposti saatavilla, ja apuna suunnittelussa voitiin hyödyntää valmistajan tähän tarkoitukseen tarjoamaa selainpohjaista Webench-suunnitteluohjelmaa [9]. Piiri on pakattu TSSOP-16-koteloon, eikä näin ollen vie piirilevyä paljoa tilaa.

2.2.4 Gate driver -hakkuri

Isoloitua 5V:n jännitteen luomista varten yrityksellä oli kuvassa 3 näkyvä valmis kytkentä, johon osat saatiin pulssimuuntajaa myöten suoraan varaston hyllyltä. Hakkurin lähtöön tarvittiin minimissään arviolta 5,6 V:n jännite, jotta regulointi jänniteregulaattorilla 5 V:iin onnistuisi. Kytkennässä käytetyn pulssimuuntajan ensiökäämin yli oli mitattu 100 mA:n kuormalla noin 2,5 V:n jännitehäviö, ja näinollen kytkennän arvioitiin vaativan katkottavaksi jännitteeksi vähintään 8,2 V, josta saatiin minimijännitevaatimus LM5574-piiriä käyttävälle hakkurille.



Kuva 3. Gate driver-hakkurin kytkentäkaavio

2.2.5 Lähtöjännitteiden skaalaus

Sekä jännitteen- että virranmittauksessa käytettyjen piirien ulostuloihin oli lisättävä puskurivahvistinkytkennät, joilla piirien ulostulot saatiin skaalattua välille 0...3,3 V. Mitattavaan linjaan olisi aina kytkettynä tasajännite samoin päin, joten jännitteenmittauspiirin differentiaalinen ulostulo voitiin suunnitella yksipuoliseksi.

Virta voi mittauslinjassa kulkea kumpaankin suuntaan, koska akkulinjasta voidaan halutaan mitata sekä lataus- että purkuvirtaa. Virranmittauspiirin ulostulo oli näinollen skaalattava siten, että virran ollessa nolla moduulin ulostulojännite virran osalta olisi 1,65 V. Ladattaessa akkua moduulin mittausalueen yläpäässä 40 A:n virralla jännite moduulin lähdössä olisi 3,3 V, ja purettaessa 40 A:n virralla 0 V.

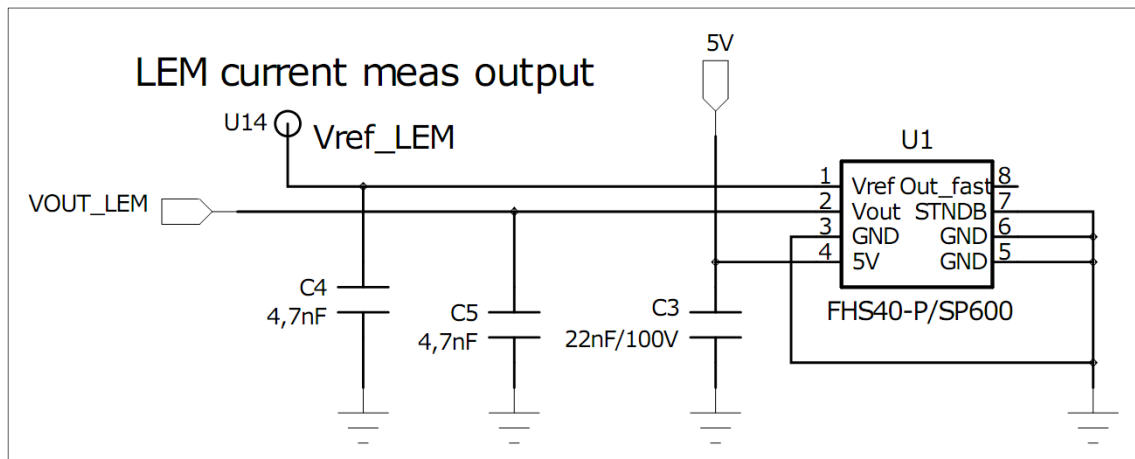
Puskurivahvistinpiirinä käytettiin National Semiconductorsin yleiskäyttöistä LM358-operaatiovahvistinta. LM358 oli tarkoitukseen sopiva, koska se toimii yksipuolisella käyttöjännitteellä ja sitä oli saatavana yrityksen varastosta. 8-jalkaisessa kotelossa piirillä on kaksi vahvistinta, jotka riittivät tämän työn tarpeisiin.

3 MODUULIN SUUNNITTELU JA MITOITUS

Moduulin eri osioiden suunnittelussa ja mitoituksessa käytettiin apuna valmistajien datalehtiä sekä yleisesti alan kirjallisuutta. Datalehtien tarjoamista esimerkkikytkenneistä oli hyvä lähteä liikkeelle, ja yksinkertaisten kytkentöjen simuloinneissa käytettiin National Instrumentsin Multisim-piirinsuunnitteluohjelmaa ja simulaattoria, jonka opiskelijaversio oli saatavana ilmaiseksi. Multisim osoittautui työssä käteväksi, nopeaksi ja helpoksi työkaluksi.

3.1 LEM Minisens

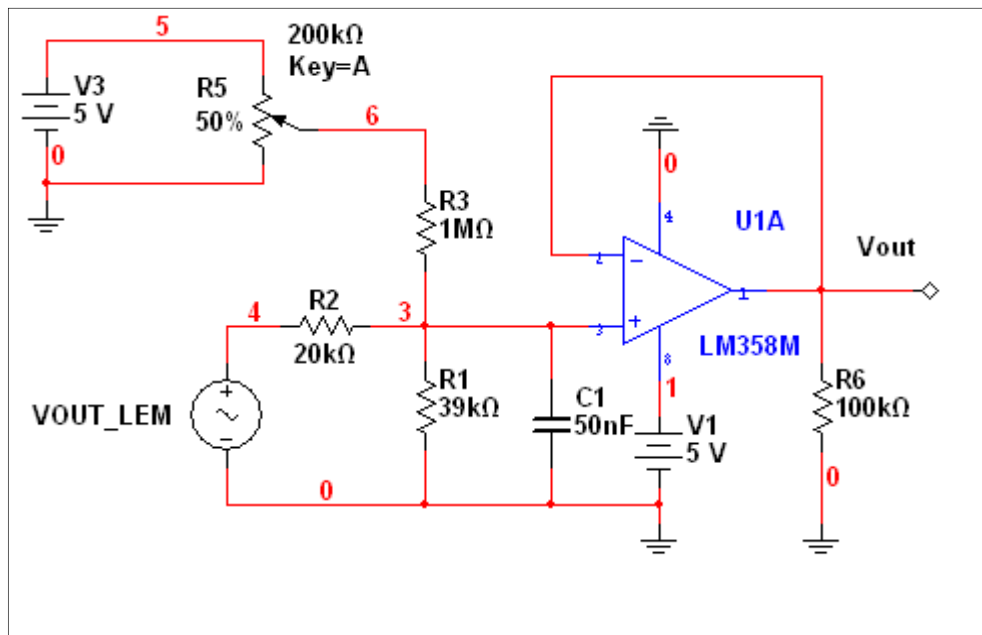
LEMin Minisens-piirin ympärille koottiin suoraan datalehden suosituksen mukainen, kuvassa 4 näkyvä kytkentä [3], joka koostui lähinnä muutamasta kondensaattorista. Piiristä ulos saatava 2,5 V:n referenssi-jännitepinni sekä $V_{OUTFast}$ jätettiin ilmaan, koska niitä ei tarvittu. Näin ollen Minisens-piirin osalta huomio keskittyi lähinnä piirilevyn layoutsuunnitteluun ja piirin perässä olevaan puskurivahvistimeen.



Kuva 4. Minisens-piirin kytkentäkaavio

3.2 Puskurivahvistinkytken

Minisens-piirin lähtöön suunniteltiin yksinkertainen vaimenninkytken piiristä saatavan, maksimissaan +5 V:n ulostulojännitteen laskemiseksi. Kytken on kuvassa 5 näkyvä ei-invertoiva jännitteenseuraja [1], jonka tulossa signaali on skaalattu jännitteenjaolla sopivaksi. Kytkenässä on lisänä offset-jännitteen säätö, joka on toteutettu yksinkertaisesti 200 kΩ:n potentiometrillä ja 1 MΩ:n vastuksella.



Kuva 5. Minisens-piirin puskurivahvistinkytken

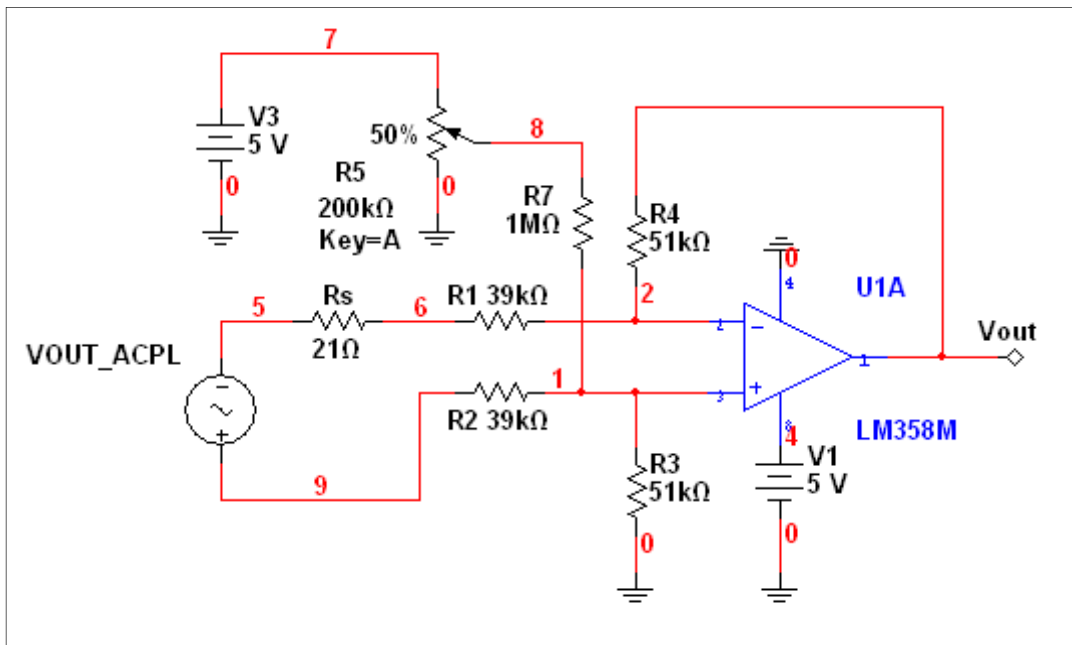
Lähtöjännite V_{out} , kun tulojännite $VOUT_LEM = 5V$, saadaan vastusten $R1$ ja $R2$ suhteesta:

$$5V \times \frac{39k\Omega}{39k\Omega + 20k\Omega} = 3,305V \quad (1)$$

Virran ollessa nolla vahvistinkytken lähtöjännite on 1,65 V, eli puolet lähtösignaalin 3,3 V:n jänniteskaalasta.

Offsetjännitteen säätö on tässä lähinnä lisäominaisuus, eikä sen vaikutusta vahvistinkytken ole sen tarkemmin laskettu. Tarkoitus oli testata sen hyödyllisyyttä valmiissa kytkenässä, ja tarvittaessa se saataisiin poistettua jättämällä vastus $R3$ latomatta. Odotettavissa oli muutenkin, että jotain komponenttiarvoja saatettaisiin joutua tarkistamaan lopullisessa laitteessa.

Isolointivahvistimen differentiaaliseen lähtöön tehtiin kuvan 6 mukainen differentiaalisella tulolla varustettu operaatiovahvistinkytkentä, jolla differentiaalinen tulojännite saatiin skaalattua 0...3,3 V:iin maatasoon nähden. Suunnitteluun otettiin vinkkiä isolointivahvistimen datalehdellä olevasta kytkennästä. Kytkennässä on lisäksi offsetjännitteen kompensointi toteutettuna edellisen kytkennän tapaan potentiometrillä ja 1 MΩ:n vastuksella, joka poistamalla kompensoinnista voidaan tarvittaessa luopua. Kompensointia oletettiin kuitenkin tarvittavan, koska operaatiovahvistin ei yksipuolisella käyttöjännitteellä toimi lineaarisesti pienillä tulojännitteillä. Vahvistimen toiseen tulonastaan lisätyllä pienellä lisäjännitteellä tästä saatettaisiin kuitenkin simulaatioden mukaan päästä eroon.



Kuva 6. Isolointivahvistimen puskurivahvistinkytkentä.

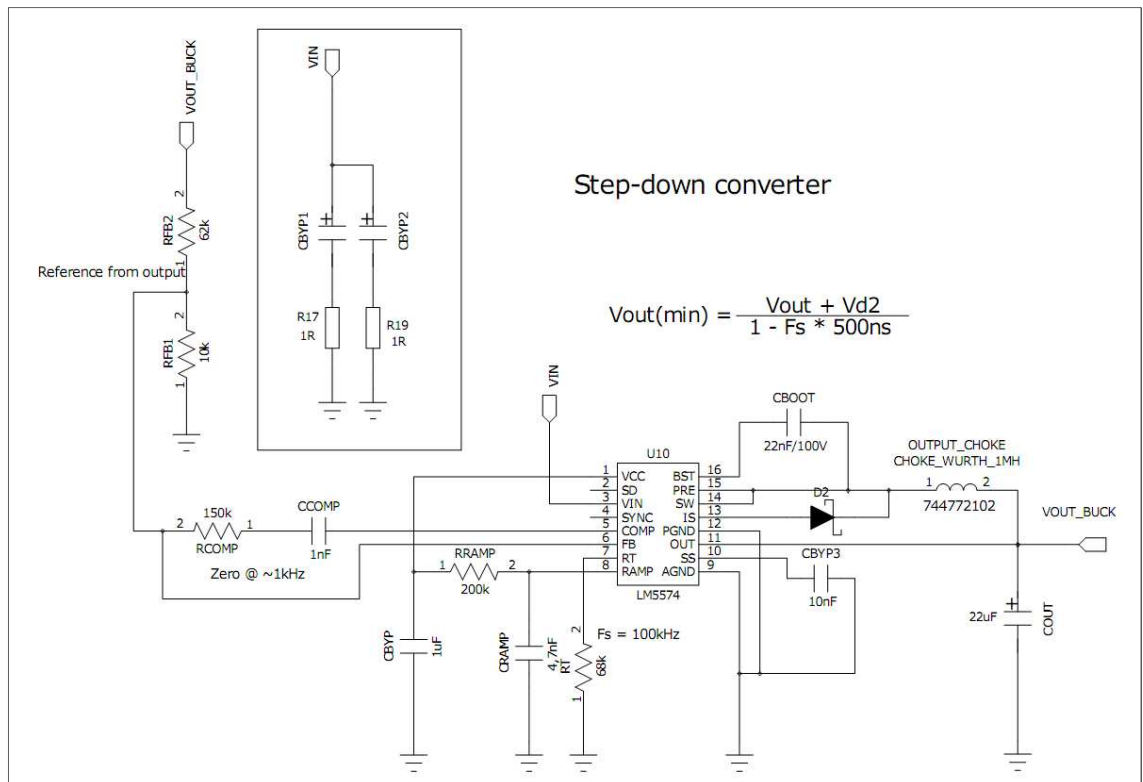
Kytkennässä lähtöännite saadaan tulojännitteestä seuraavasti [1]:

$$V_{out} = V_{OUT_{ACPL}} \times \frac{R_4}{R_1} = 2,5 \text{ V}_{pp} \times \frac{51\text{k}\Omega}{39\text{k}\Omega} = 3,27 \text{ V}_{pp} \quad (2)$$

Jännitteen skaalauksen tarkkuuteen vaikuttaa vastusten toleranssi sekä operaatiovahvistinkytkennässä että isolointivahvistimen ensiöpuolella olevassa vastusjaossa. Tämän tarkempia laskuja ei puskurikytkennöistä koettu tarpeellisiksi.

3.3 Käyttöjännitehakkurin kytkentä

Suurinta huolellisuutta vaativa mitoitus työssä oli moduulin käyttöjännitepuolen suunnitteleminen. Työ tehtiin sekä LM5574:n datalehden tietojen perusteella käsin että National Semiconductorsin Webench-ohjelmalla. Kuvassa 7 on lopullinen hakkurikytkentä.



Kuva 7. LM5574-piirin kytkentäkaavio

Hakkurikytkennän suunnittelu aloitettiin ulostulokelan mitoituksesta. Kelan kokoon vaikuttaa pääasiassa käytetty kytkentätaajuus sekä minimi ulostulovirta, joka arvioitiin laskuja varten varovaisesti 40 mA:n tasolle. Jotta hakkurin lähtövirta pysyisi koko ajan jatkuvana, pitää maksimirippelivirraksi arvioida minimilähtövirta kerottuna kahdella [2]:

$$I_{ripple} = 2 \times I_{OutMin} = 80 \text{ mA.} \quad (3)$$

Lähtökelan arvo saatiin seuraavasta kaavasta [2]:

$$L = \frac{V_{Out} \times (V_{InMax} - V_{Out})}{I_{ripple} \times F_S \times V_{InMax}} = \frac{8,5 \text{ V} \times (72 \text{ V} - 8,5 \text{ V})}{80 \text{ mA} \times 100 \text{ kHz} \times 72 \text{ V}} \approx 940 \text{ } \mu\text{H} \rightarrow 1 \text{ mH.} \quad (4)$$

Kun piirin kytkentätaajuudeksi on valikoitunut 100 kHz, voidaan määrittää vastus R_T , jolla kytkentätaajuus asetetaan, seuraavalla kaavalla [2]:

$$R_T = \frac{\left(\frac{1}{100 \text{ kHz}}\right) - 580 \times 10^{-9}}{135 \times 10^{-12}} = 69,78 \text{ k}\Omega \approx 68 \text{ k}\Omega. \quad (5)$$

LM5574 muodostaa ulostulon ohjaukseen tarrvittavan PWM-signaalin vaatiman saha-aallon suoraan lähdön rippelivirran I_{ripple} avulla. Näin piiristä on saatu yksinkertainen, ja takaisinkytkentälänkin taajuusvasteessa vaikuttaa vain yksi napa, jolloin kytkentä pysyy hyvin stabiilina. Saha-aalto luodaan piirin sisäisellä kytkennällä, joka koostuu kahdesta osasta: näytteenotto ja pito -piiristä sekä lähtövirtaa emuloivasta kytkennästä. Saha-aallon luova kytkentä vaatii vain yhden ulkoisen kondensaattorin, jonka arvo lasketaan seuraavasti [2]:

$$C_{RAMP} = L \times 5 \times 10^{-6} = 1 \text{ mH} \times 5 \times 10^{-6} = 5 \text{ nF} \rightarrow \text{lähin arvo } 4,7 \text{ nF} \quad (6)$$

Lähtöjännitteen taso säädetään vastusjaolla vastusten R_5 ja R_6 avulla. Ulostulo haluttiin noin 8,5 V:n tasolle ja vastukseksi R_6 valittiin 10 k Ω , jolloin vastuksen R_5 arvoksi saatiin: [2]

$$\frac{R_5}{R_6} = \frac{V_{Out}}{1,225 \text{ V}} - 1 \rightarrow R_5 = R_6 \times \left(\frac{8,5 \text{ V}}{1,225 \text{ V}} - 1\right) = 59,39 \text{ k}\Omega \approx 62 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

Piirin ulkoisilla komponenteilla R_{COMP} ja C_{COMP} säädetään piirin takaisinkytkentälänkin vahvistus stabiilille alueelle. Alun perin ylimmäksi tehonkulutusvaatimukseksi oli arvioitu 2 W, josta laskemalla 8,5 V:n ulostulojännitteellä saatiin kuormaksi noin 36 Ω . Tämän perusteella saatiin laskettua takaisinkytkentäpiirin DC-vahvistus sekä taajuusvasteen dominoiva napa matalilla taajuuksilla, kun hakkurin ulostulossa on 22 μF :n kondensaattori [2]:

$$DC \text{ Gain}_{(MOD)} = G_{m(MOD)} \times R_{LOAD} = 0,5 \times 36 \text{ } \Omega = 18 = 25 \text{ dB,} \quad (8)$$

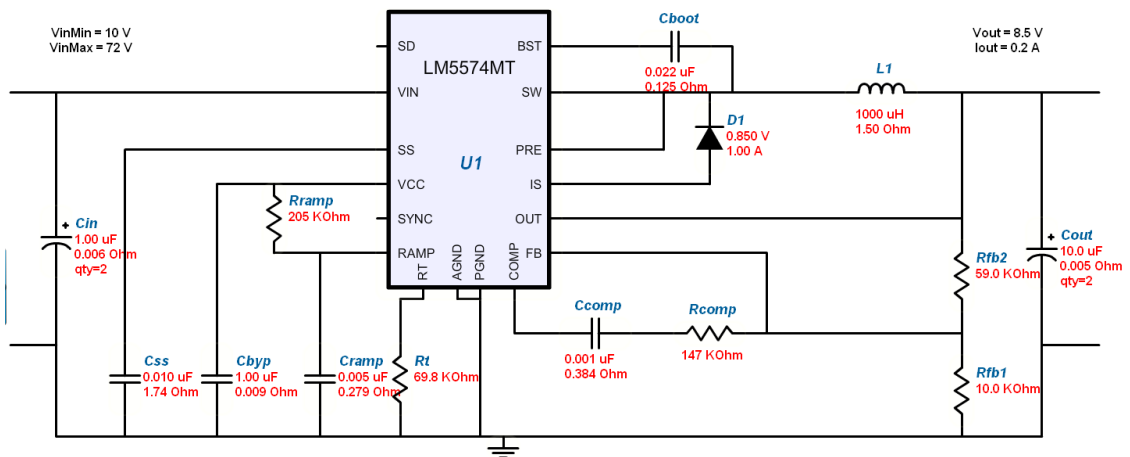
$$f_{p(MOD)} = \frac{1}{2\pi \times R_{LOAD} \times C_{OUT}} = \frac{1}{2\pi \times 36 \text{ } \Omega \times 22 \text{ } \mu\text{F}} = 200 \text{ Hz} \quad (9)$$

Tämän perusteella voitiin laskea arvot vastuksen R_{COMP} ja kondensaattorin C_{COMP} muodostamalle alipäästösuodattimelle, jolla saadaan kompensoitua dominoiva 200 Hz taajuudella oleva napa takaisinkytkennän taajuusvasteesta. Kun kondensaattorin

C_{COMP} kapasitanssiksi valittiin 1 nF ja vasteen nolla haluttiin 200 Hz:n yläpuolelle noin 1 kHz taajuudelle, vastuksen R_{COMP} arvoksi saatiin [2]:

$$1 \text{ kHz} = \frac{1}{2\pi \times R_{COMP} \times 1 \text{ nF}} \rightarrow R_{COMP} = 159 \text{ k}\Omega \approx 147 \text{ k}\Omega \quad (10)$$

Loput hakkurikytkennän komponenteista valittiin LM5574-piirin datalehden suositusten mukaan. Vertailun vuoksi sekä vinkkien hakemiseksi katsottiin myös mitä valmistajan Webench-ohjelma tarjoaisi ratkaisuksi. Käsin piirin datalehden tietojen perusteella lasketut arvot olivat hyvin yhteneviä Webenchin tarjoaman ratkaisun kanssa, joka näkyy kuvassa 8.



Kuva 8. Webench-ohjelmalla aikaansaatu kytkentä [9]

Kondensaattorit ovat kaikki keraamisia matalan sarjavastuksen (ESR) omaavia malleja rippelivirtojen minimoimiseksi. Lähdön kelaksi valittiin Würthin standardi 1 mH:n 300 mA:n malli.

Lähdön diodiksi valittiin suositusten mukaan matalan kynnysjännitteen schottky-diodi, jollaista käytetään piirikortilla myös suojaamaan hakkuripiirin sisääntuloa jännitteen väärinkytkenältä. Vishayn valikoimissa oli sopiva SMD-diodi, jonka kynnysjännite tässä sovelluksessa tulisi olemaan arviolta 0,5 V. Aluksi harkittiin sisääntulon suojauksen toteuttamista diodisillalla, mutta vaarana olisi tällöin ollut hakkurille tulevan jännitteen lasku liian alas minimisisääntulojännitteellä kahden diodin sarjaankytkennän vuoksi, joten

tulossa päätettiin käyttää vain yhtä diodia. Käyttöjännite on näin ollen kytkettävä moduuliin aina oikein päin.

3.4 Piirilevy

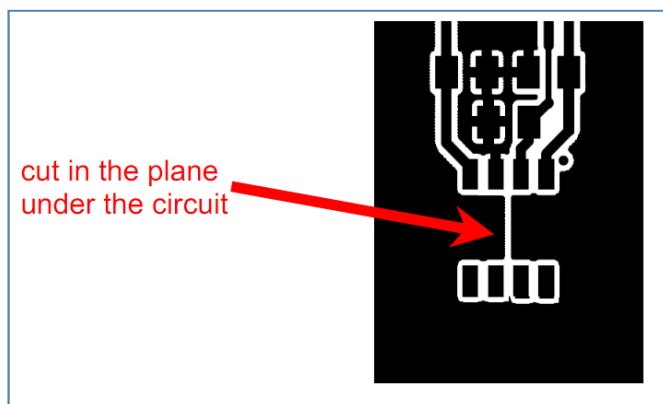
Piirilevy suunniteltiin Mentor Graphicsin Pads-ohjelmistolla, joka oli yrityksen käytössä ja josta oli kokemusta jo opiskelujen ajalta. Työn aikana kokemus Padsista karttui melkoisesti, vaikka esimerkiksi uusien komponenttien luominen sekä toimivien kuparialueiden tekemisessä oli omat haasteensa.

Piirilevyn suunnittelu aloitettiin toteutuksesta, jossa mitattavan linjan leveät kuparivedot kulkevat kortin oikeassa laidassa ja käyttöjännite- ja ulostuloliittimet sijaitsevat kortin vastakkaisella reunalla. Mitattava linja sijoitettiin levyn päällipuolelle, jonka kuparikerroksen paksudeksi haluttiin 70 µm riittävän virrankuljetuskyvyn varmistamiseksi. Mitattavan linjan lähialue levyllä haluttiin pitää vapaana komponenteista ja kuparialuesista lukuun ottamatta jännitteen mittauksessa tarvittavia jännitteenjakovastuksia, linjaan kytkettävien johtojen liittimiä sekä mitattavasta linjasta otettavan käyttöjännitesyötön katkaisun mahdollistavia SMD-jumppereita. Läpiladottavat osat sijoitettiin levyn päällipuolelle ja pintaosat pohjaan, mikä mahdollisti pintaliitososien latomisen ladontakoneella ja koko piirilevyn juottamisen aaltojuotoskoneella.

Komponenttien sijoittelussa pyrittiin noudattamaan hyviä piirilevynsuunnittelutapoja [4]. Piirilevyllä olevat hakkurikytkennät sijoitettiin mahdollisimman kauas ulostulosignaaleista, ja niille tehtiin muusta maa-alueista erillään olevat maa-alueet. Jänniteregulaattorien, operaatiovahvistimen, isoioitivahvistimen toisiopuolen sekä Minisens-piirin jakama maa-alue (GND) yhdistettiin yhdestä pisteestä LM5574-piirin maa-alueeseen, jotta levyllä muodostuvat mahdolliset maalenkit ja häiriöt pysyisivät pieninä. Kytkentöjen vaatimat käyttöjännitteet pyrittiin kuljettamaan piirilevyn pintapuolella, signaalivedot vedettiin pääosin pohjapuolella.

Puolijohdekomponenttien käyttöjännitteiden ohituskondensaattorit sijoitettiin luonnollisesti mahdollisimman lähelle komponenttien käyttöjännitejalkoja, ja isolointivahvistimen sekä Minisens-piirin ympäristön suunnittelussa noudatettiin valmistajien datalehdiltä löytyviä suosituksia [3]. Minisens-piirin ympärille tehtiin valmistajan suosituksen mukainen, piirin keskeltä katkaistu maa-alue, joka näkyy kuvassa 9. Myöhemmässä vaiheessa piirilevyyn mahdollisesti liitettävää plugin-korttia varten levyllä on 20-pinninen piirikanta, johon laajennuskortin riviliitin voidaan liittää.

Laajennuskortin vaatima tila tuli pitää vapaana korkeista läpiladottavista osista, mikä osaltaan vaikutti komponenttien sijoitteluun.



Kuva 9. Minisens-piirin datalehden suositus maa-alueeksi piirin alla [3]

3.4.2 Komponenttien koneladonta ja aaltojuotos

Piirilevyjen tultua tehtaalta käytiin läpi ladottavien komponenttien lista, jonka jälkeen ladottiin kymmenen kortin sarja. Suurin osa komponenteista oli tarkoituksella valittu yrityksestä jo valmiina löytyviksi osiksi. Protosarjaan jäi näin ollen käsin juotettaviksi osiksi vain muutama IC-piiri ja muutama muu SMD-komponentti.

Koneellinen ladonta ja juottaminen säästi työhön käytettyä aikaa, ja mahdolliset käsinjuottamisesta tapahtuvat virheet saatiin näin minimoitua. Ladonta- ja juotostyö onnistui hyvin, eikä se häirinnyt yrityksen varsinaista tuotantoa.

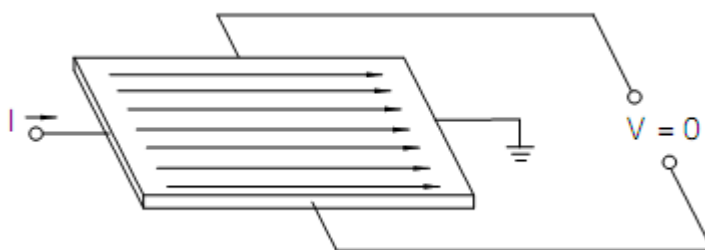
4 HALL-ILMIÖ JA HALL-ANTURIT

Hall-ilmiön löysi vuonna 1879 tohtori Edwin Hall ollessaan tohtoriopiskelijana Hopkinsin yliopistossa Baltimoressa. Halle huomasi, että kun magneetti asetetaan siten, että sen magneettikenttä on kohtisuorassa ohueen, kullasta valmistettuun neliöön nähden jonka läpi virta kulkee, kappaleen päiden välille muodostuu jännite. Hall huomasi, että tämä jännite riippuu kappaleen läpi kulkevan virran voimakkuudesta sekä kohtisuorassa kappaleeseen olevan magneettikentän voimakkuudesta. Vaikka Hallin tekemät kokeet olivat menestyksekkäitä ja saivat aikanaan huomiota, ei Hall-ilmiöön perustuvia käytännön sovelluksia keksitty yli 70 vuoteen [5].

Myöhemmin, kun Hall-elementtejä ja niihin liittyviä instrumentointikytkentöjä pystyttiin integroimaan samalle integroidulle piirille, alkoivat tällä tekniikalla toteutetut anturipiirit yleistyä mittaustekniikassa. Virran mittauksen lisäksi magneettikentän voimakkuutteen reagoivia antureita käytetään myös erilaisina asento- ja liiketunnistimina, esimerkiksi auton nokka-akselin asentotunnistimena ja ABS-jarrujen pyörimistunnistimena.

4.1 Hall-anturin toimintaperiaate

Kun virtajohdin asetetaan magneettikenttään, johtimen päiden välille syntyy jännite, joka riippuu sekä magneettikentän voimakkuudesta että johtimen läpi kulkevasta virrasta. Kun johdin ei ole magneettikentässä, johtimen läpi kulkeva virta on yhtenäinen, eikä johtimen päiden välille synny jännite-eroa. Kuvassa 10 virtajohdinten läpi kulkee virta, mutta magneettikentän puuttuessa johtimen sivujen välillä ei ole jännite-eroa.

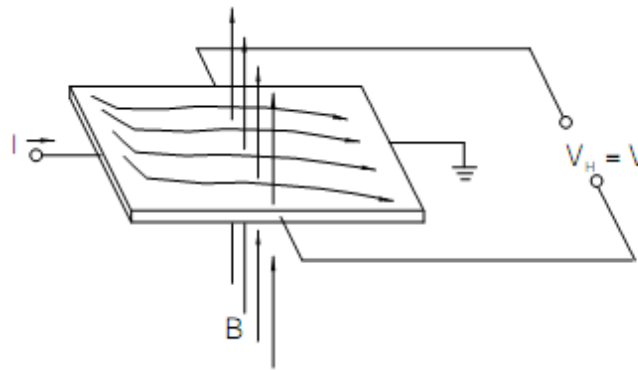


Kuva 10. Virtajohdin, kun magneettikenttää ei ole [5]

Kun johdin tuodaan magneettikenttään, vaikuttaa Lorentzin voima virran kulkuun johtimessa. [6] Kuvassa 11 Lorentzin voima häiritsee virran kulun jakautumista johtimessa, joka johtaa jännite-eroon johtimen sivujen välillä. Tätä jännitettä kutsutaan Hallin jännitteeksi. Magneettivuon tiheyden, johtimessa kulkevan virran ja Hallin jännitteen välinen yhteys noudattaa kaavaa

$$V_H \propto I \times B, \quad (11)$$

jossa V_H on Hallin jännite. Hallin jännite on siis verrannollinen johtimessa kulkevan virran ja magneettivuon tiheyden ristituloon.



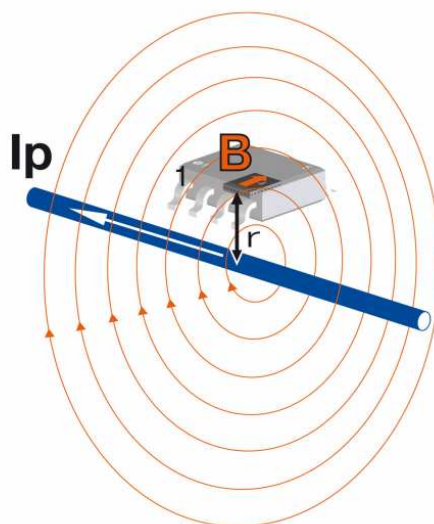
Kuva 11. Hall-elementti magneettikentässä [5]

Virran mittausta johtimesta Hall-anturilla perustuu ilmiöön, jossa johtimessa kulkeva virta aiheuttaa johtimen ympärille magneettikentän. Mitattaessa erillisessä johtimessa kulkevaa virtaa Hall-periaatteella toimivalla anturilla, mitataan tässä johtimessa kulkevan virran aiheuttamaa magneettivuon tiheyttä johtimen läheisyydestä. Ohuessa johtimessa kulkevan virran aiheuttama magneettivuon tiheys noudattaa kaavaa

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \times \frac{I_P}{r}, \quad (12)$$

jossa I_P on mitattava virta, r on etäisyys johtimen keskipisteestä ja μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti. Etäisyys mitattavasta johtimesta siis vaikuttaa suuresti mittauksen herkkyyteen, ja haluttaessa mittaukselta suurta herkkyyttä käytettävän anturin on sijaittava mahdollisimman lähellä mitattavaa johdinta kuvan 12 mukaisesti. Hyvä tapa tähän on mitata virtaa suoraan piirilevyn pinnalla kulkevasta ohuesta vedosta, jolloin

anturipiirin tarkka sijoittelu mitattavaan johtimeen nähden on helppoa. Tässä tulee kuitenkin ottaa huomioon mahdollinen vaatimus mitattavan linjan eristämisestä anturista ja siihen liittyvästä muusta elektroniikasta riittävällä eristävälillä, mikä tämänkin työn suunnittelussa otettiin huomioon.

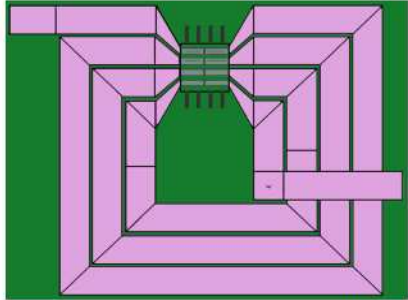
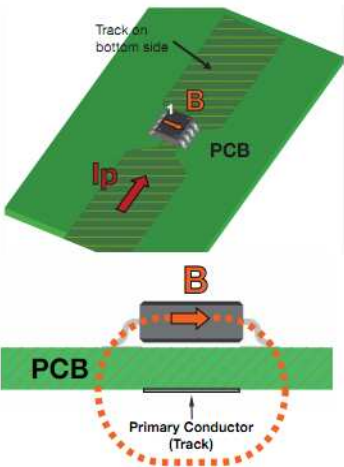


Kuva 12. Anturipiirin sijoitus johtimeen nähden [3]

Johtimen aiheuttamaa magneettikentän voimakkuutta anturin läheisyydessä voidaan lisätä käänimällä mitattava virtajohdin kelaksi anturin alle, jolloin johtimen aiheuttama magneettivuon tiheys anturin kohdalla kertaantuu käämittyjen kierrosten määrällä. Näin saadaan lisättyä mittauksen herkkyyttä, toisaalta tämä johtaa ohuempiin vetoihin, jolloin ei voida mitata niin suuria virtoja. Kuvassa 13 vasemmalla on esitelty tämän tyyppinen kupariveto.

Mitattaessa suuria virtoja mitattava veto voidaan kuljettaa myös anturipiirin alapuolisen vedon sijasta anturipiirin päältä, jolloin vetona voidaan käyttää kaapelia. Tällöin on kuitenkin varmistuttava siitä, että anturipiirin asema kaapeliin nähden pysyy luotettavasti vakiona.

Tässä työssä käytetyn Minisens-piirin datalehdiltä löytyi erilaisia valmiita ehdotuksia piirilevyn suunnitteluun ja joitain suuntaviivoja siitä, miten erilaiset mitattavan vedon toteutukset vaikuttavat mittaukseen. Kuvassa 13 oikealla on tässä työssä hyödynnetty konfiguraatio.

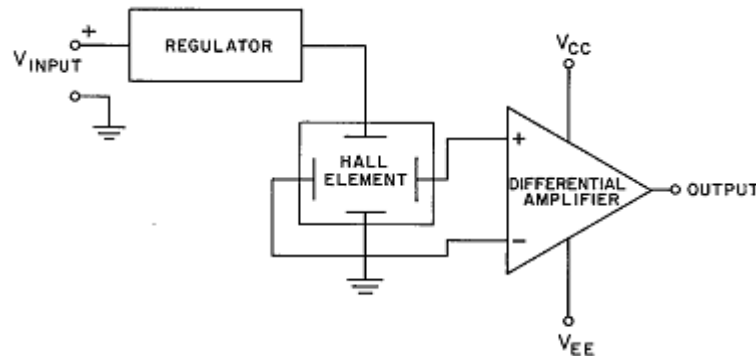
4 turns bottom side High isolation configuration	Track bottom side High isolation configuration	
 <p>KIT 8</p> <p>Creeepage, clearance 8 mm</p> <p>Nominal primary current I_{PN} 5 A (85°C ambient, natural convection, 30°C track temperature rise)</p> <p>Measuring range I_{PM} 15 A</p> <p>Sensitivity G 126 mV/A</p> <p>Track width under IC 0.78 mm</p> <p>Track width elsewhere 3 mm</p> <p>A demo board of this design is available GE.00.23.107.0</p> <p>PCB characteristics 1.6 mm / 70 μm Cu</p>	 <p>KIT 5 KIT 9</p> <p>Creeepage, clearance 8 mm 8 mm</p> <p>Nominal primary current I_{PN} 16 A 30 A (85°C ambient, natural convection, 30°C track temperature rise)</p> <p>Measuring range I_{PM} 55 A 76 A</p> <p>Sensitivity G 36 mV/A 26 mV/A</p> <p>Track width under IC 3 mm 8 mm</p> <p>Track width elsewhere 10 mm 16 mm</p> <p>A demo board of this design is available G2.00.23.104.0 GE.00.23.108.0</p> <p>PCB characteristics 1.6 mm / 70 μm Cu</p>	

Kuva 13. Erilaisia johdinveitoja piirilevyllä ja niiden vaikutuksia Minisensin toimintaan [3]

Tässäkin työssä käytetty Hall-anturi pitää sisällään yksinkertaisen Hall-elementin, joka magneettikentän voimakkuuden ja muuntaa sen jännitearvoksi. Useimpien sovellusten tapauksessa tällainen anturi vaatii elementistä saatavan heikon signaalin vahvistamista ja muokkausta paremmin käsiteltävään muotoon, joka tarkoittaa instrumentointivahvistinten käyttöä sekä lämpötilakompensointia. Kuvassa 14 on tällaisista osista koostuvan anturin lohkokaavio. Hall-elementistä saatava signaali vaatii aina differentiaalisen vahvistinkytkennän, sillä mittaelementin potentiaali maahan nähden on kelluva.

Hall-elementistä saatava jännite on tasoltaan erittäin pieni, noin 30 mV:n luokkaa 100 μ T:n magneettikentän voimakkuudessa. Tämä vaatii, että elementin perässä käytettävä instrumentointivahvistin omaa pienen kohinan, suuren tuloimpedanssin sekä

suhteellisen pienen vahvistuksen. Tällainen lämpötilakompensoitu differentiaalinen vahvistin on kuitenkin nykyään helposti integroitavissa samalle piirille Hall-elementin kanssa, jolloin integroituun kytkentään vaikuttavat ulkoiset häiriöt pysyvät minimissään. Kehittynyt puolijohdetekniikka on mahdollistanut tällaisten antureiden valmistamisen edullisesti.



Kuva 14. Yksinkertainen Hall-anturi [5]

Koska Hallin jännitteeseen vaikuttaa sekä Hall-elementtiin kohtisuorassa olevan magneettivuon tiheys että elementissä kulkeva virta, täytyy luotettavan ja tarkan mittauksen vuoksi elementin läpi kulkevan virran olla mahdollisimman tasainen ja häiriötön. Tämän vuoksi tarkkojen mittausten varmistamiseksi anturin käyttöjännitteiden on oltava hyvin reguloituja.

4.2 Edut ja haitat muihin tekniikoihin nähden

Ennen Hall-anturien yleistymistä virran mittauksessa käytettiin yleensä joko jonkinlaista sarjavastusta tai mittaumuuntajaa. Näiden tekniikoiden kiistaton etu Hall-antureihin nähden on niiden yksinkertaisuus, passiivinen rakenne sekä edellisistä johtuva edullisuus. Sarjavastusta, jota myös shunttivastukseksi kutsutaan, käyttämällä päästään virran mittauksessa hyvään tarkkuuteen, ja shuntin käyttö onkin kaikkein toimivin vaihtoehto tilanteessa, jossa mitataan suhteellisen pieniä virtoja ja näinollen myös mittauksen aiheuttama hukkateho pysyy pienenä. Shunttivastusta käyttämällä ei kuitenkaan saada aikaiseksi täydellistä galvaanista erotusta mitattavasta sähkölinjasta, ja linjan vikaantuessa mittauselektronikka voi olla vaarassa vahingoittua. Tämä on riski erityisesti mitattaessa virtaa linjasta, jossa on suuria jännitteitä.

Mittamuuntajan käyttö ei tarjoa virran mittauksessa samanlaista tarkkuutta kuin shunttivastus, mutta sillä saadaan aikaan galvaaninen erotus mitattavasta linjasta. Mitamuuntajan huono puoli on kuitenkin tehonkulutus ja tarve kuljettaa mitattava virta muuntajan käämin läpi, jolloin väkisinkin vaikutetaan enemmän tai vähemmän virran kulkuun mitattavassa järjestelmässä.

Hall-anturin heikkoutena voidaan pitää sen herkkyyttä ulkoisten magneettikenttien aiheuttamille häiriöille, kuten maan magneettikentän vaikutukselle. Magneettisten häiriöiden estäminen voi aiheuttaa vaikeuksia, sillä häiriöistä eristämiseen ei useinkaan riitä pelkkä metallisten koteloiden käyttö. Magneettikentästä eristämiseen käytetty koteloINTI pitää lisäksi tehdä ferromagneettisesta aineesta, joten esimerkiksi alumiininen kotelo ei toimisi tässä taroituksessa.

5 MODUULIN RAKENTAMINEN JA TESTAUS

Moduulista rakennettiin valmiiksi testausta varten yksi koekappale, jonka suorituskkyä testattiin. Komponenteille haettiin testauksen ja mittauksen aikana lopullisia arvoja, jotka voitaisiin tarvittaessa korjata loppuihin moduuleihin.

Pääosa komponenteista saatiin onnistuneesti ladottua ja juotettua koneellisesti, mutta isolointivahvistin, virranmittauspiiri sekä operaatiovahvistin juotettiin käsin, koska näitä komponentteja ei joko löytynyt käytettävissä olleesta varastosta tai niitä ei voinut latio ladontakoneella. Rakentaminen oli helppoa, koska juottamiseen oli käytettävissä hyvät työkalut aina mikroskooppia myöten. Piirilevyllä oleviin kiinnitysreikiin kiinnitettiin korttituet, joilla levyn pohjassa sijainneet pintaliitoskomponentit saatiin pysymään irti alustasta. Mittausten ajaksi moduuli ruuvattiin kiinni laudankappaleeseen, joka kiinnitettiin testauspöytään. Mittaukset olivat täten turvallisesti ja luotettavasti suoritettavissa.

Testaus aloitettiin tutkimalla piirin käyttöjännitteet ja hakkurienkytkentöjen toiminta. Tämän jälkeen testattiin ja mitattiin jännitteenmittausosio ja kun se oli todettu toimivaksi, huomio kohdistettiin virranmittauspuolen tutkimiseen.

5.1 Testausympäristö ja -laitteisto

Kytkenän toiminnan testauksessa käytettiin alkuvaiheessa yleismittaria, jolla testattiin piirilevyn galvaaniset yhteydet ja niiden oikeellisuus ja pyrittiin saamaan selville mahdolliset oikosulut. Moduulin käyttöjännitetasot saatiin myös testattua yleismittarilla, sekä saatiin mitattua miten hyvin ulostulojännitteet ovat halutulla tasolla. Kaikissa mittauksissa moduulin käyttöjännite tuotiin ulkoisesta lähteestä, johon käytettiin säädettävää laboratoriovirtalähdettä. Virran- ja jännittemittauksen lopullinen testaus suoritettiin järjestelyllä, jossa 1600 W:n tehollähteellä syötettiin virtaa aktiiviseen kuormaan eri virroilla ja jännitteillä. Virran ja jännitteen todellinen taso, johon mittaustuloksia verrattiin, saatiin mittauksissa käytetystä kuormalaitteesta joka kertoo ne riittävällä tarkkuudella.

Laitteen lämpenemistä tutkittiin lämpökameralla. Huomion kohteena oli mitattavan linjan kupariveto piirilevyllä, joka on ohuimmassa kohdassaan vain 3 mm leveä. Lämpötilan mittausta antoi viitteitä siitä millaisissa olosuhteissa laitetta voitaisiin tällaisenaan käyttää. Laitteen signaalien lineaarisuutta tutkittiin eri lämpötiloissa ja magneettisen anturin ollessa kyseessä myös eri asennoissa.

5.2 Agilent tiedonkeruulaite

Ulostulevat signaalit mitattiin moduulin ulostuloliittimistä Agilentin 34970A -tiedonkeruulaitteella, jossa oli multiplekseri useampien kanavien mittaamiseksi. Tiedonkeruulaitteella voidaan mitata sekä tasa- että vaihtojännitettä ja -virtaa, lämpötilaa erilaisilta lämpöantureilta, resistanssia, taajuutta ja jaksonaikaa. Tässä työssä mittaukseksi riitti tasajännitteen mittausta moduulin lähtöliittimistä sekä lämpötilojen mittausta virranmittauspiiriltä sekä ympäristöstä.

Tiedonkeruulaite oli yhdistetty USB-liitännällä PC:hen, josta mittauksia ohjattiin käyttämällä Agilentin VEE -ohjelmistoa, jolla ohjelmoitiin mittauksessa sovellettu mittaushjelma. VEE:llä voitiin ohjelmoida mittaukseen mittausloopeja, joilla voitiin määrittää esimerkiksi mittaustulosten hajontaa luotettavasti suuresta määrästä tuloksia. VEE graafisena ohjelmointiympäristönä osoittautui helpoksi käyttää, ja sen hyödyntäminen nopeutti ja helpotti mittauksia huomattavasti.

VEE:stä mittaustulokset siirrettiin taulukkolaskentaohjelmaan tulkintaa varten. Käsien laskenta saatiin näin minimoitua ja suurta määrää mittaustuloksia oli helppo käsitellä.

Kuvassa 15 näkyy käytettyä testauslaitteistoa.

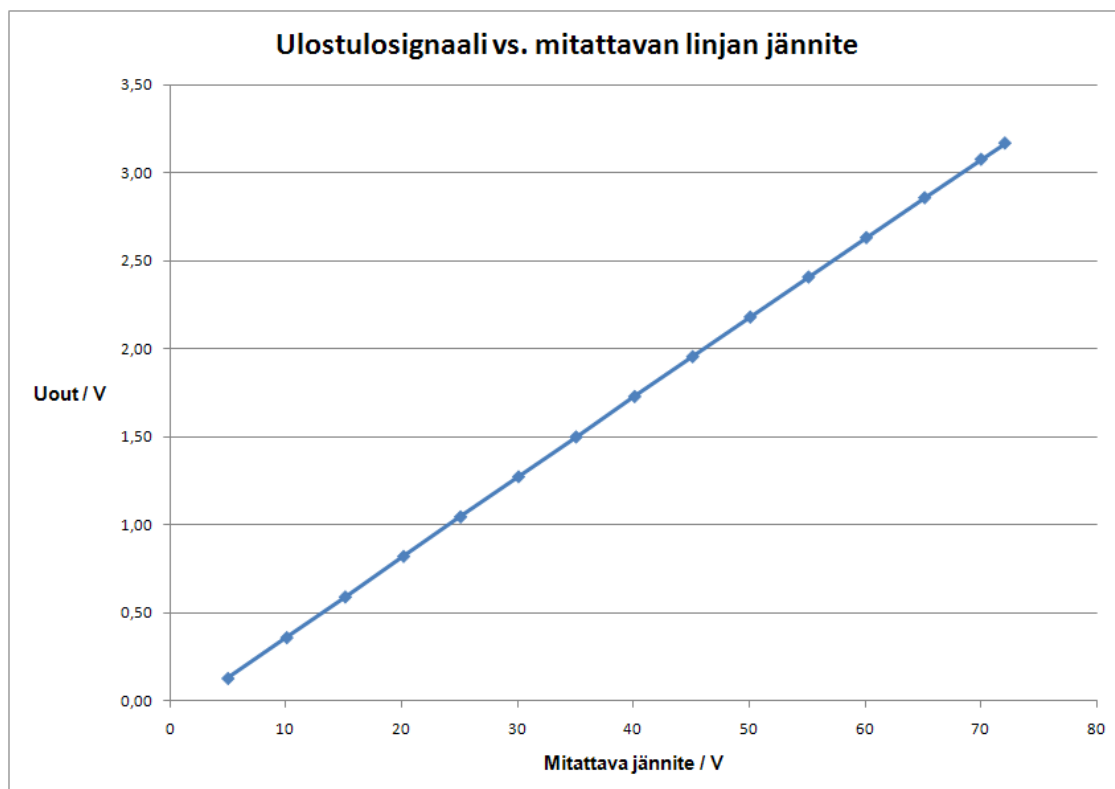


Kuva 15. Moduuli ja testauslaitteistoa

6 LOPPUTULOKSET JA JATKOKEHITYS

6.1 Jännitteen mittaaminen

Lopullisessa mittausjärjestelyssä tutkittiin ensin jännitteenmittauksen toiminta. Aluksi tutkittiin mittausalue, jota varten mitattiin ulostulosignaalia mitattavan linjan jännitteen vaihdelta 5...72 V. Ulostulojännitteen käyttäytyminen suhteessa mitattavaan jännitteeseen (kuva 16) oli odotetusti hyvin lineaarista, ja alue ulottui hieman yli 72 V:n.



Kuva 16. Jännitteenmittauksen lähtösignaali mitattavan linjan jännitteen suhteen

Ulostulojännite 72 V:n sisäänmenolla oli 3,17 V, joka jäi hieman halutusta 3,3 V:sta. Tämä johtuu todennäköisesti komponenttiarvojen hajonnasta sekä vastusjaossa mitattavan linjan yli että puskurina toimivassa operaatiovahvistinkytkenässä. Taso on kuitenkin

hyväksyttävä, ja pieni marginaali maksimitasoon voi olla joissain tilanteissa toivottavaakin.

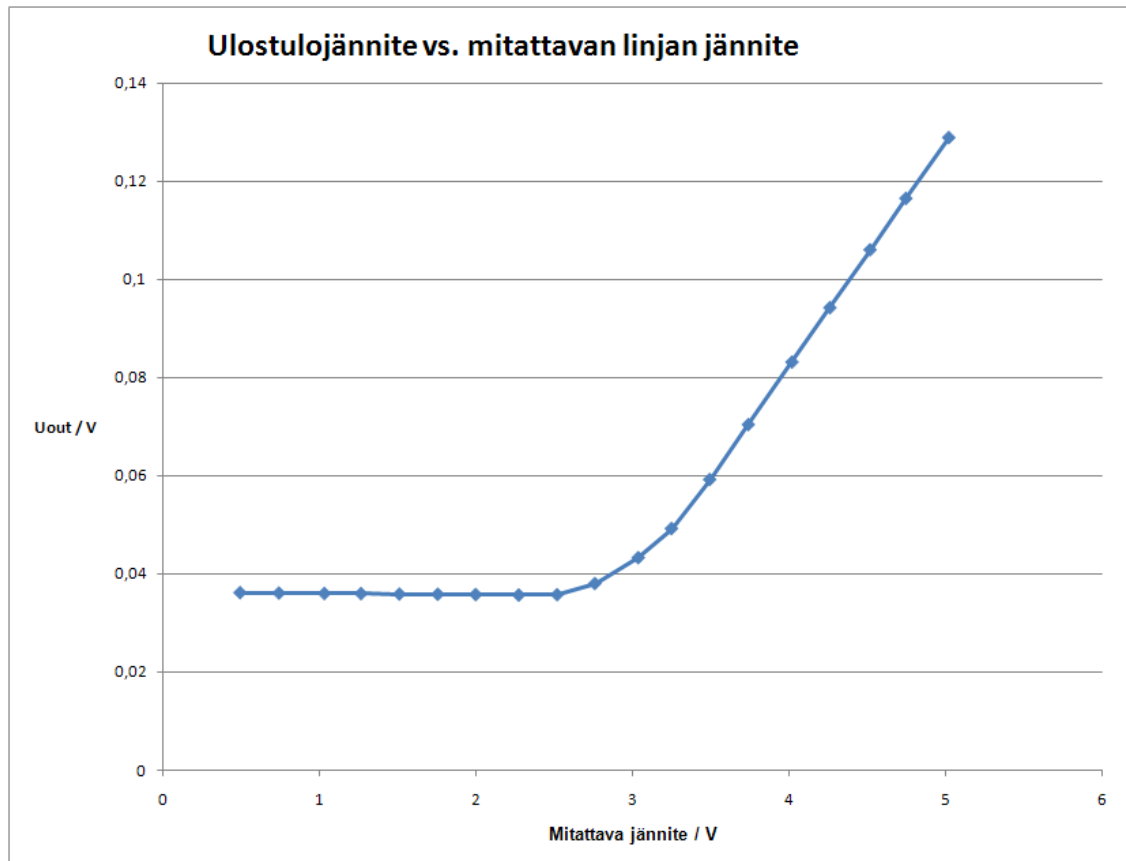
Pienillä, alle 3,5 V:n jännitteillä jännitemittaus ei toiminut lineaarisesti, mikä nähdään kuvasta 17. Tilanteen parantamiseksi jännitemittauksen puskurivahvistinkytkennässä on offset-jännitteen lisäys, jolla ulostulojännite saadaan pienilläkin sisääntulojännitteillä lineaariselle alueelle. Tämä säätö voidaan suorittaa tarpeen vaatiessa, ja sopiva taso pohjajännitteelle on noin 60...100 mV.

Taulukossa 1 listattujen mittaustulosten perusteella ulostulosignaalin ja mitattavan linjan jännitteiden suhteeksi laskettiin

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{3,166 \text{ V} - 0,128 \text{ V}}{72,1 \text{ V} - 4,98 \text{ V}} = \frac{45,3 \text{ mV}}{\text{V}}.$$

Taulukko 1. Jännitteenmittauksen lähtöjännitteet tulojännitteillä 5...72 V

Mitattava jännite/V	Lähtöjännite/V
4,98	0,128
10,05	0,359
15,11	0,591
20,15	0,821
25,07	1,045
30,08	1,273
35,05	1,498
40,11	1,728
45,12	1,954
50,09	2,179
55,14	2,406
60,12	2,630
65,16	2,856
70,04	3,075
72,10	3,166



Kuva 17. Lähtöjännite pienillä mitattavan linjan jännitteillä

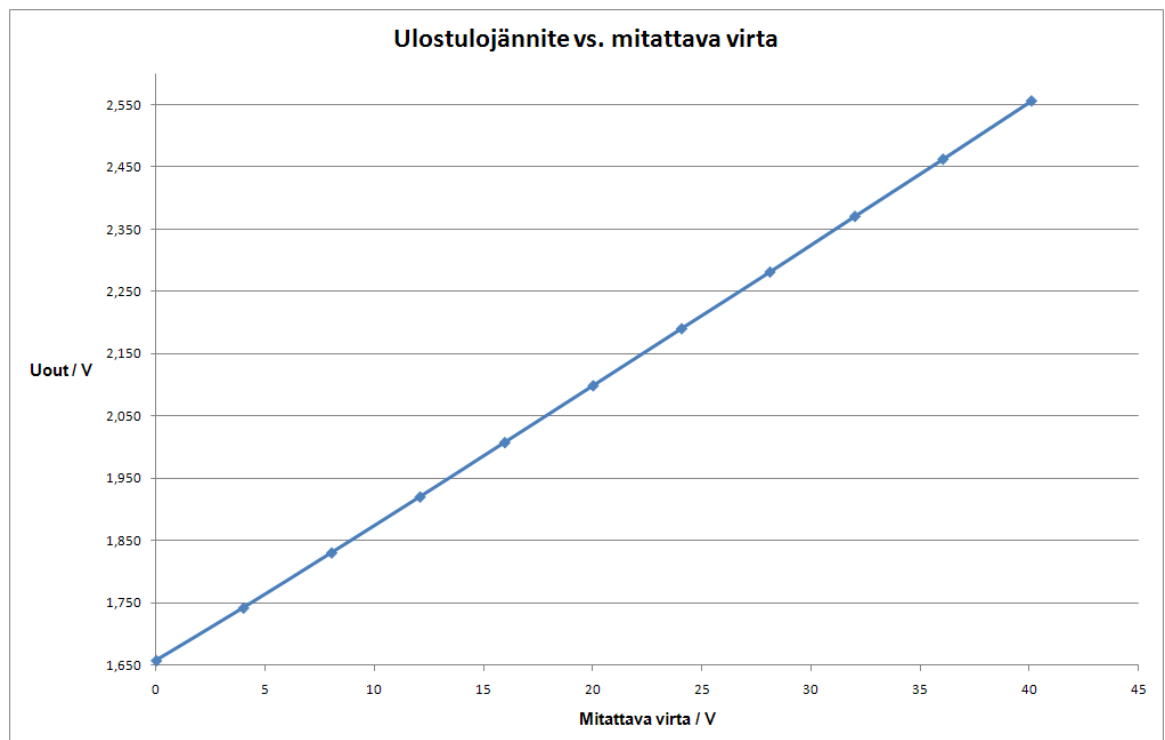
Kompensointikytkennässä oleva $1\text{ M}\Omega$:n vastus $200\text{ k}\Omega$:n trimmerivastuksen ja operaatiovahvistimen sisääntulonastan välillä osoittautui liian suureksi, joka rajoitti säätöaluetta liikaa. Tilanne saatiin korjattua vaihtamalla vastus pienempään.

Jännitteenmittauspuoli ei tässä työssä ollut avainasemassa, ja kun se oli todettu toimivaksi ja mahdolliseksi toteuttaa työssä käytetyllä menetelmällä ja osilla, voitiin keskittyä virran mittauksen tutkimiseen.

6.2 Virran mittaus

Virranmittauksessa tutkittiin ensin lähtösignaalin taso virran ollessa 0 A ilman lähtöjännitteen kompensointisäätöä puskurivahvistimessa. Tätä varten mitattavan linjan navat oikosuljettiin ja lähtösignaalia mitattiin yleismittarilla. Lähtöjännitteen tuli olla 1,65 V:n tasolla, josta se jäi hieman alle. Tilanne korjattiin ottamalla puskurivahvistinkytken kytkeä käyttöön, ja lisäämällä näin puskurivahvistimen tuloon pieni offset-jännite jännitemittauksen tapaan. Tässäkin tapauksessa kompensointikytkennässä käytetyn 200 k Ω :n vastuksen ja puskurivahvistimen tulonastan välillä ollut 1 M Ω :n vastus korvattiin pienemmällä, jotta säätövara saatiin ulotettua tarpeeksi laajalle.

Virtaa mitattiin ajamalla virtaa kuormaan tyypillisillä 12 V:n ja 24 V:n jännitteillä, maksimivirran ollessa 40 A. Ensin selvitettiin millä alueella mittaus toimii, eli mikä on ulostulojännite virran ollessa 0...40 A. Mittaustulokset taulukoitiin (taulukko 2) ja piirrettiin kuvassa 11 näkyvä käyrä ulostulojännitteelle mitattavan virran suhteen.



Kuva 18. Virranmittauksen lähtöjännite virran suhteen

Taulukko 2. Virranmittauksen lähtöjännitteet virroilla 0...40 A

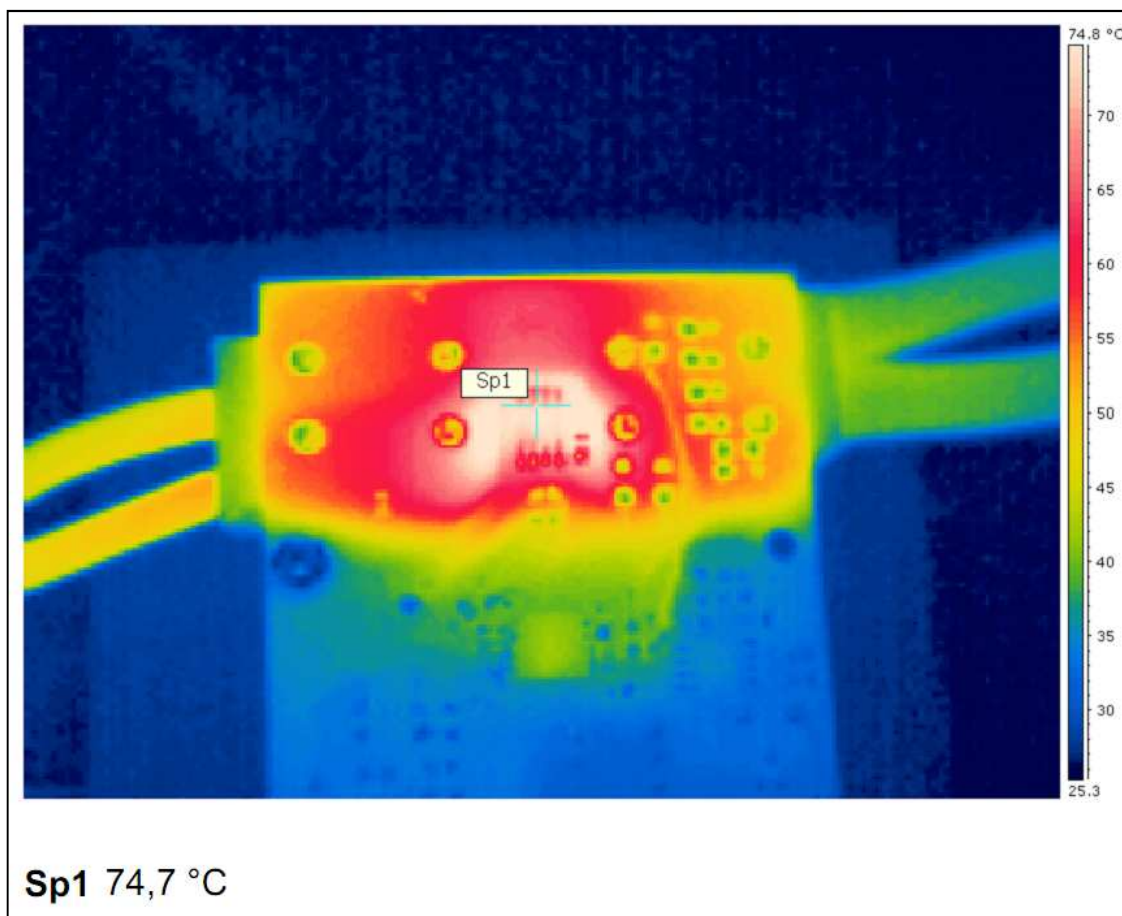
Mitattava virta/I	Lähtöjännite/V
0,00	1,658
3,99	1,742
8,03	1,831
12,08	1,920
15,96	2,008
20,01	2,099
24,06	2,190
28,11	2,281
32,00	2,370
36,04	2,462
40,09	2,555

Taulukosta nähdään, että ulostulojännite 40 A virralla oli noin 2,55 V, eli ulostulon jännitealueesta jäi käyttämättä noin 0,6 V. Tämän voisi korjata muuttamalla puskirivahvistimen vaimennusta pienemmäksi, jolloin nollavirtapiste myös nousisi ylemmäs. Näin saataisiin lisättyä lähdön herkkyyttä suhteessa mitattavaan virtaan. Herkkyydeksi ulostulolle saatiin näistä mittaustuloksista laskettua noin 22,4 mV/A.

Laskennallisesti maksimi mitattava virta tällä kytkennällä olisi noin 73 A. Moduulilla virranmittausalue ulottuu siis laajemmalle kuin mitä oli alun perin vaadittu, joka hieman rajoittaa mittaustuloksen dynamiikkaa. Moduuli ei kuitenkaan tällaisenaan sovellu suuremmille kuin 40 A:n virroille, koska rajoittavaksi tekijäksi nousee mitattavan linjan vedon virransietokyky piirilevyllä sekä moduulissa käytetyt virtajohtimien liittimet, joiden virrankesto on 41 A.

Mittapiirin ja moduulin muiden pintaosien lämpenemistä tutkittiin ensin lämpökameralla. Lämpökameralla otettujen kuvien perusteella piirilevyllä eniten lämpenevä osa oli mitattavan linjan piirilevyveto ohuimmasta kohdastaan, jonka lämpeneminen oli merkittävää. Veto lämmitessään lämmitti myös tehokkaasti virranmittauspiiriä, joka nosti huolen moduulin kapeasta käyttölämpötila-alueesta.

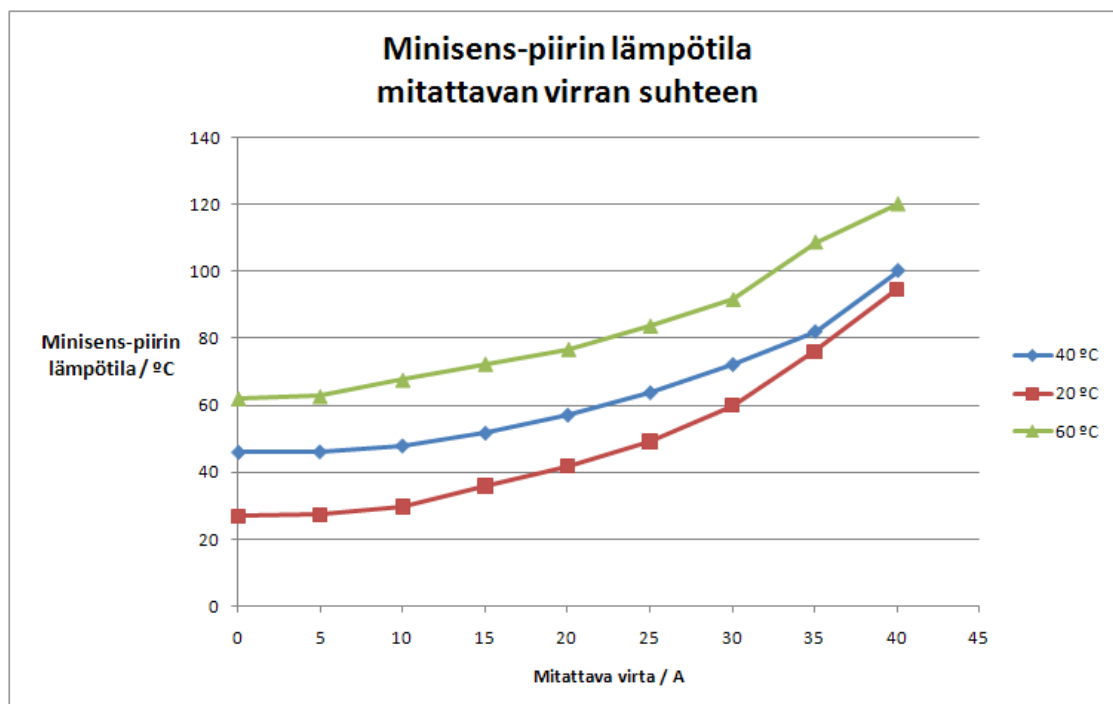
Mittapiiri lämpeni vapaassa tilassa huoneenlämmössä 40 A:n virralla jopa 75-asteiseksi, mikä näkyy kuvassa 19. Ilmiön johdosta moduulin toimintaa eri lämpötiloissa alettiin tutkia tarkemmin. Mittapiiri on sisäisesti lämpötilakompensoitu, ja tämän kompensoinnin toimivuus haluttiin saada selville.



Kuva 19. Mitattava veto lämmittää virranmittauspiiriä

Mittapiirin suurimmaksi käyttölämpötilaksi on luvattu 125 °C, ja tämän vuoksi selvitettiin missä ympäristön lämpötilassa voidaan vielä mitata 40 A:n virtaa. Tämän mittaamiseksi mittalinjaan kytkettiin kulkemaan 12 V:n jännitteellä 40 A:n virta, ja moduulia käytettiin lämpökaapissa 20 °C, 40 °C ja 60 °C lämpötiloissa. Moduulista mitattiin virranmittauspiirin lämpötilaa lämpötila-anturilla, kun virtaa nostettiin 0 A:sta 40 A:iin. Tuloksista piirrettiin kuvassa 20 näkyvät käyrät.

Mittauksesta havaittiin, että mittapiiri pysyy juuri ja juuri käyttölämpötila-alueellaan 60 °C lämpötilassa mitattavan virran ollessa 40 A, jolloin mittapiirin lämpötila nousi noin 120 °C tasolle. Ehdottomana käyttölämpötilan maksimi arvona voitiin siis pitää 60 °C tasoa, jollei mittapiiriä ole erikseen jäähdytetty.

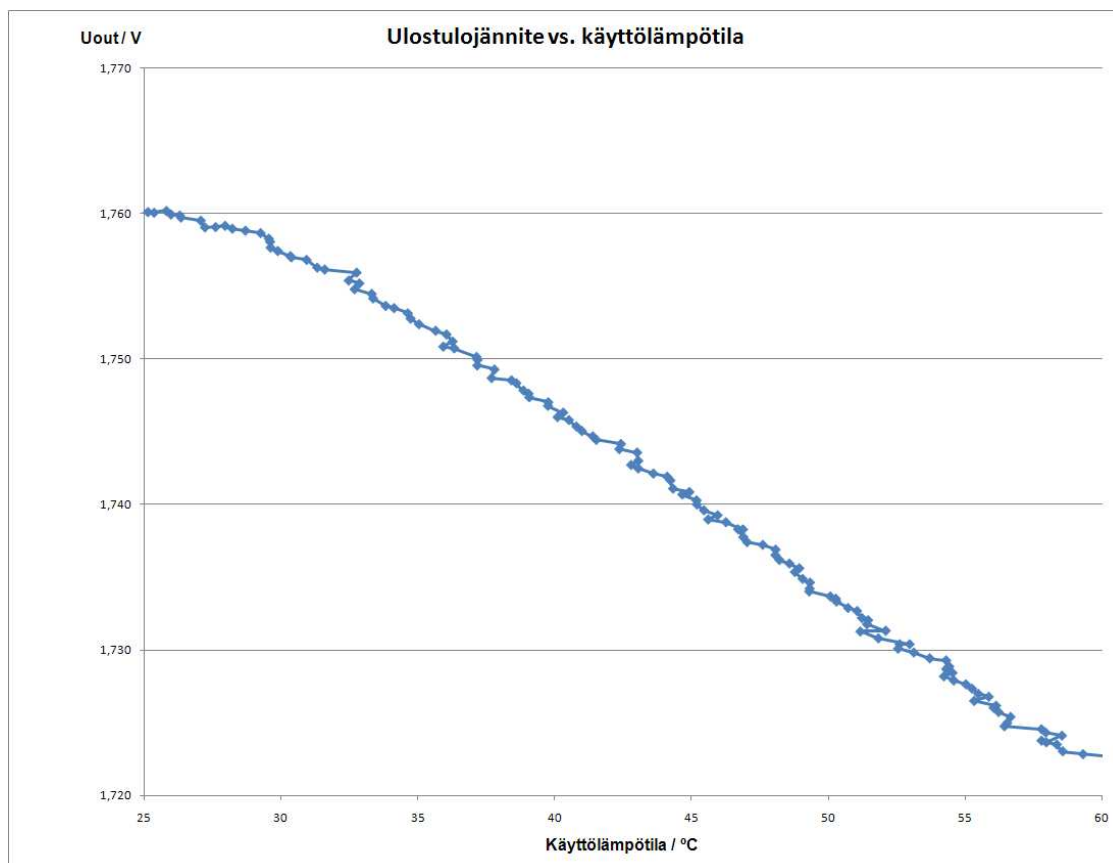


Kuva 20. Minisens-piirin lämpeneminen mitattavan virran kasvaessa

Lämpötilan vaikutusta mittausmoduulin ulostuloihin tutkittiin laittamalla moduuli lämpökaappiin ja mittaamalla ulostuloja vakiovirralla ja -jännitteellä lämpötilan noustessa 0 °C:sta 60 °C:een. Jännitteen mittauksia suoritettiin tasaisesti 10 s välein. Mittauksen ajaksi mitattavaan linjaan kytkettiin tyypillinen 10 A:n virta jännitteen ollessa 12 V.

Mittausten perusteella havaittiin, että moduulin ulostulojännitteet muuttuvat ympäristön lämpötilan mukaan suhteellisen paljon. Kuvasta 21 nähdään, että ulostulojännitteen muutosta 60 °C lämpötilaskaalalla tuli noin 40 mV alaspäin, joka vastaa virtatietona noin 2 A:n virtaa. Tämä oli moduulin tarkkuusvaatimukset huomioon ottaen liian suuri vaihtelu, joten virheen lähdettä alettiin etsimään tarkemmin.

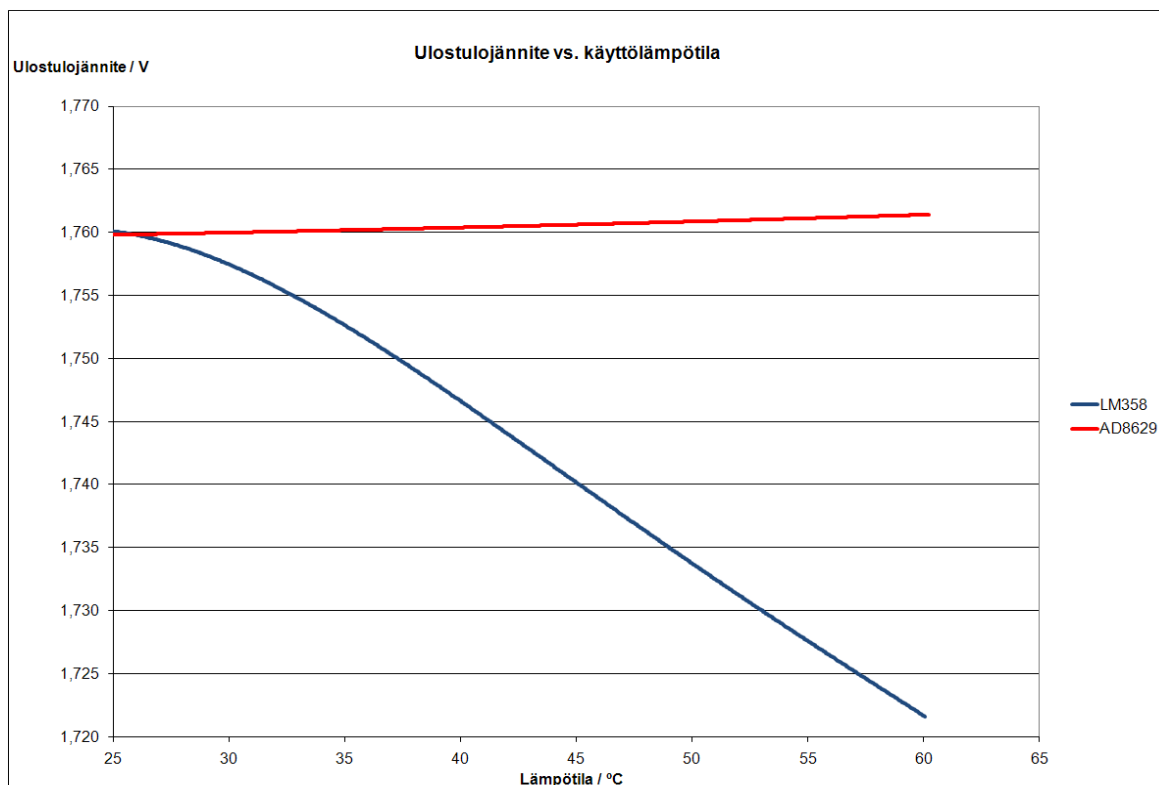
Seuraavissa mittauksissa mitattiin suoraan virranmittauspiirin ulostulojännitettä, ja sen havaittiin pysyvän suhteellisen stabiilina lämpötilan suhteen. 60 °C lämpötilaskaalalla mittapiirin ulostulojännite muuttui alle 10 mV ylöspäin, josta voitiin päätellä suurimman virheen moduulin ulostulojännitteessä johtuvan lähdössä olevasta operaatiovahvistimesta. Operaatiovahvistimen virhe oli siis suurempi kuin lähdestä mitattu virhe, sillä operaatiovahvistimen ulostulo kasvoi, vaikka sen sisääntulosignaali pieneni.



Kuva 21. Virranmittauksen ulostulojännitteen muutos lämpötilan suhteen

Tilanteen parantamiseksi kytkennän operaatiovahvistin päätettiin korvata paremmalla, lämpötilan suhteen stabiilimmalla mallilla, joksi valittiin Analog Devicesin AD8629. Tämä operaatiovahvistin on suunniteltu käytettäväksi mittaussovelluksissa, ja sen sisääntulo-offsetjännitteen muutokseksi luvataan vain $0,002 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ [7]. Vahvistimen käyttölämpötila-alue on $-40 \dots 125^\circ\text{C}$, joka riitti tässä sovelluksessa hyvin.

Moduulille suoritettiin lämpötilamittaukset uuden operaatiovahvistimen kanssa ulottaen mittaukset alueelle $-20 \dots 80^\circ\text{C}$. Kuvan 22 vertailukäyrästä nähdään, että moduulin ulostulojännite pysyy huomattavasti stabiilimpana lämpötilan suhteen kuin LM358-operaatiovahvistinta käytettäessä.



Kuva 22. Virranmittauksen lähtöjännite eri operaatiovahvistimilla lämpötilan noustessa

Lämpötilavaihteluiden vaikutuksen lisäksi haluttiin selvittää maapallon magneettikentän sekä muiden magneettisten häiriöiden vaikutusta moduulin ulostuloihin. Vaikutusta tutkittiin kääntelemällä moduulia eri asentoihin sekä tuomalla magneettisia kappaleita mittapiirin läheisyyteen.

Tuotaessa magneettinen ruuvimeisselin kärki parin sentin etäisyydelle mittapiiristä mittapiirin ulostulo muuttui jyrkästi aina mittausalueen päätyyn asti. Tällaista Hall-anturipiiriä käytettäessä tulee siis ottaa huomioon mahdollisten lähellä olevien magneettisten kappaleiden vaikutus mittaukseen ja mahdollisuuksien mukaan pitää tällaiset kappaleet kaukana mittapiiristä. Tämä olisi melko helposti saavutettavissa laitteen riittävän väljällä koteloinnilla.

Moduulia kääntelemällä ulostulosignaali vaihteli muutamia kymmeniä millivoltteja, joka vastaa mittaustuloksessa useita ampeereja. Toistamalla mittaukset siten, että moduuli oli sijoitettuna metallikoteloon, asennon muuttamisen vaikutus karkeasti arvioiden puolittui. Tästä huolimatta maapallon magneettikentän vaikutusta mittaustuloksiin voitiin pitää merkittävänä, ja tämän vaikutuksen kompensoiminen vaatisi muita toimenpiteitä.

Tällaisenaan moduulin kanssa käytettävät mittalaitteet tulisi kalibroida aina uudelleen, kun moduulin asentoa joudutaan muuttamaan tai se asennetaan uuteen paikkaan.

Yksi vaihtoehto tilanteen parantamiseksi voisi olla käyttää lähekkäin kahta virranmittauspiiriä siten, että toisella piirillä mitattaisiin virtaa plus- ja toisella miinusjohtimesta. Tällöin mittapiirit antaisivat yhtä suuren mutta vastakkaismerkkisen jännitteen toisiinsa nähden, ja maan magneettikentän vaikutuksen ollessa piireille yhteismuotoinen voitaisiin magneettikentän vaikutuksesta päästä eroon tuomalla kummankin piirin signaalit differentiaaliseen vahvistinasteeseen. Tällöin myös vahvistinkytkentään saatava tulosaika olisi kaksinkertainen verrattuna tilanteeseen, jossa on käytetty vain yhtä mittapiiriä.

7 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli suunnitella ja rakentaa virran- ja jännitteenmittausmoduuli, jonka virranmittaus perustuu Hall-periaatteella toimivaan anturipiiriin. Moduulin tuli olla mitattavasta linjasta galvaanisesti erotettu, joka virran mittauksen tapauksessa toteutui automaattisesti Hall-anturipiirin ansiosta. Jännitteenmittauksen osalta galvaaninen erotus mitattavasta linjasta toteutettiin käyttämällä isoiloivaa vahvistinpiiriä mitattavan linjan ja muun mittauselektroniikan välissä. Moduuli oli suunniteltu käytettäväksi osana virran- ja jännitteenmittausjärjestelmää, jossa se toimisi galvaanisena erottimena muulle mittauslaitteistolle.

Työssä suunniteltiin laitteen kytkentäkaaviot, piirilevy sekä testattiin laitteen toimintaa ja selvitettiin sen soveltuvuutta käytettäväksi tehonsyöttölinjassa. Moduulista saatiin toimiva sekä virran- että jännitteenmittauksen osalta, joskin ensimmäisessä piirilevyversiossa oli joitain pieniä huolimattomuudesta aiheutuneita suunnitteluvirheitä. Levyissä olleet virheet onnistuttiin kuitenkin korjaamaan levyihin, eikä ensimmäinen koe-erä levyjä mennyt hukkaan.

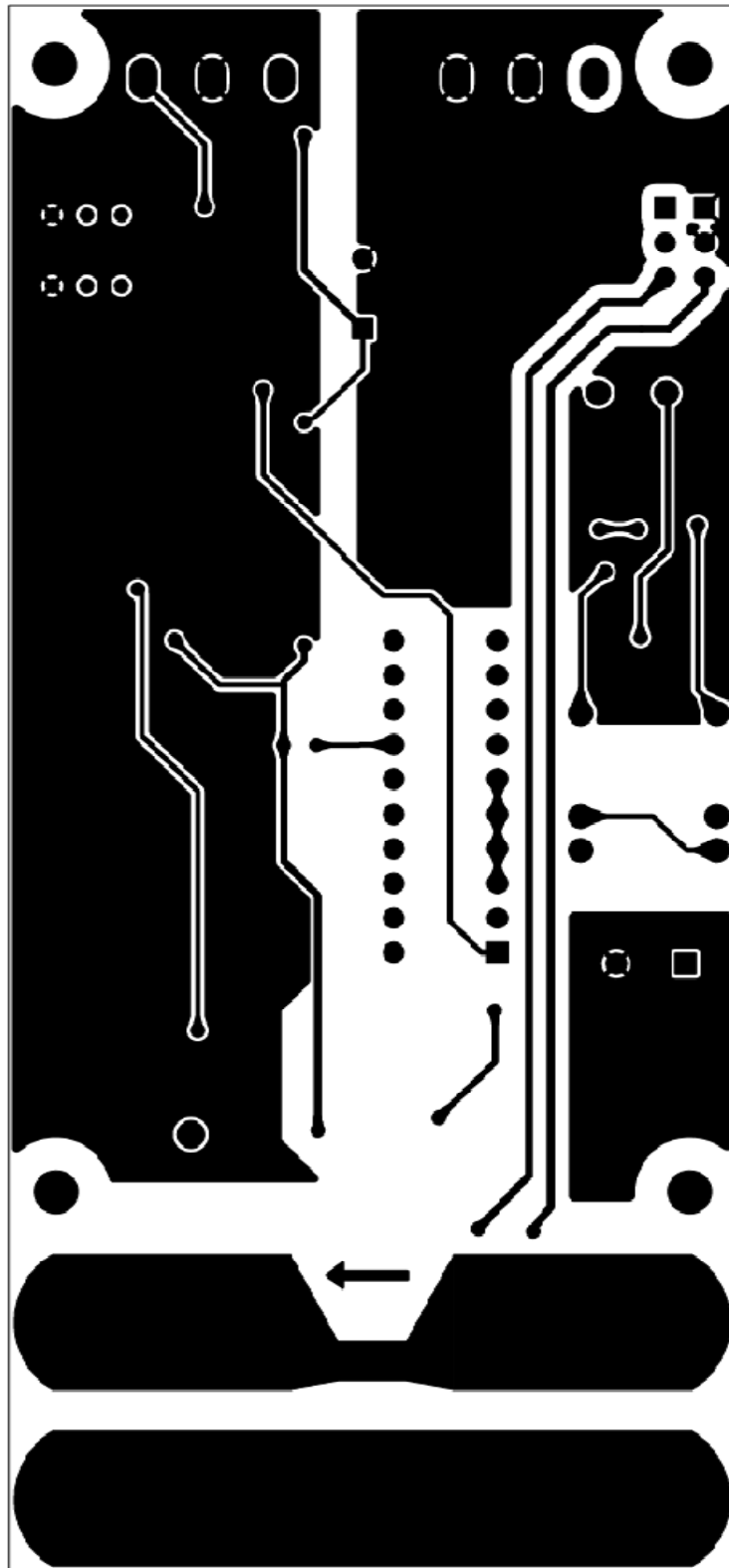
Moduulista saatiin toimiva, mutta se todettiin suhteellisen herkäksi ympäristön vaikutuksille. Jatkokehitysideana olisi selvittää virranmittauksen lineaarisuuden ja herkkyuden lisääminen erilaisella mittapiirin sijoittelulla, jolloin laitetta voitaisiin käyttää myös pienempien virtojen mittaamisessa sekä enemmän tarkkuutta vaativissa sovelluksissa. Tällaisenaan Hall-anturiin perustuvaa mittaustekniikkaa voidaan kuitenkin hyödyntää yleiskäyttöisissä tarkkailumittauksissa, joissa olosuhteet pysyvät melko stabiileina.

Tulevaisuudessa eteen voi tulla uusia ideoita tai ongelmia joita tulee ottaa seuraavien versioiden suunnittelussa huomioon, esimerkiksi mahdollinen vaatimus laitteen koteloinnista. Tutkimus- ja kehitystyötä Hall-periaatteella toimivien anturipiirien hyödyntämisessä virran mittaukseen tullaan varmasti jatkamaan, ja tavoitteena voisi olla Hall-antureiden soveltaminen myös tarkoissa säätö- ja ohjaussovelluksissa. Tässä työssä valmistettuja moduuleita voidaan kuitenkin hyödyntää työn tilanteen yrityksen testaus- ja virranseurantasovelluksissa, joissa esimerkiksi tarkkaillaan tehonsyöttöjärjestelmässä kulkevia virtoja.

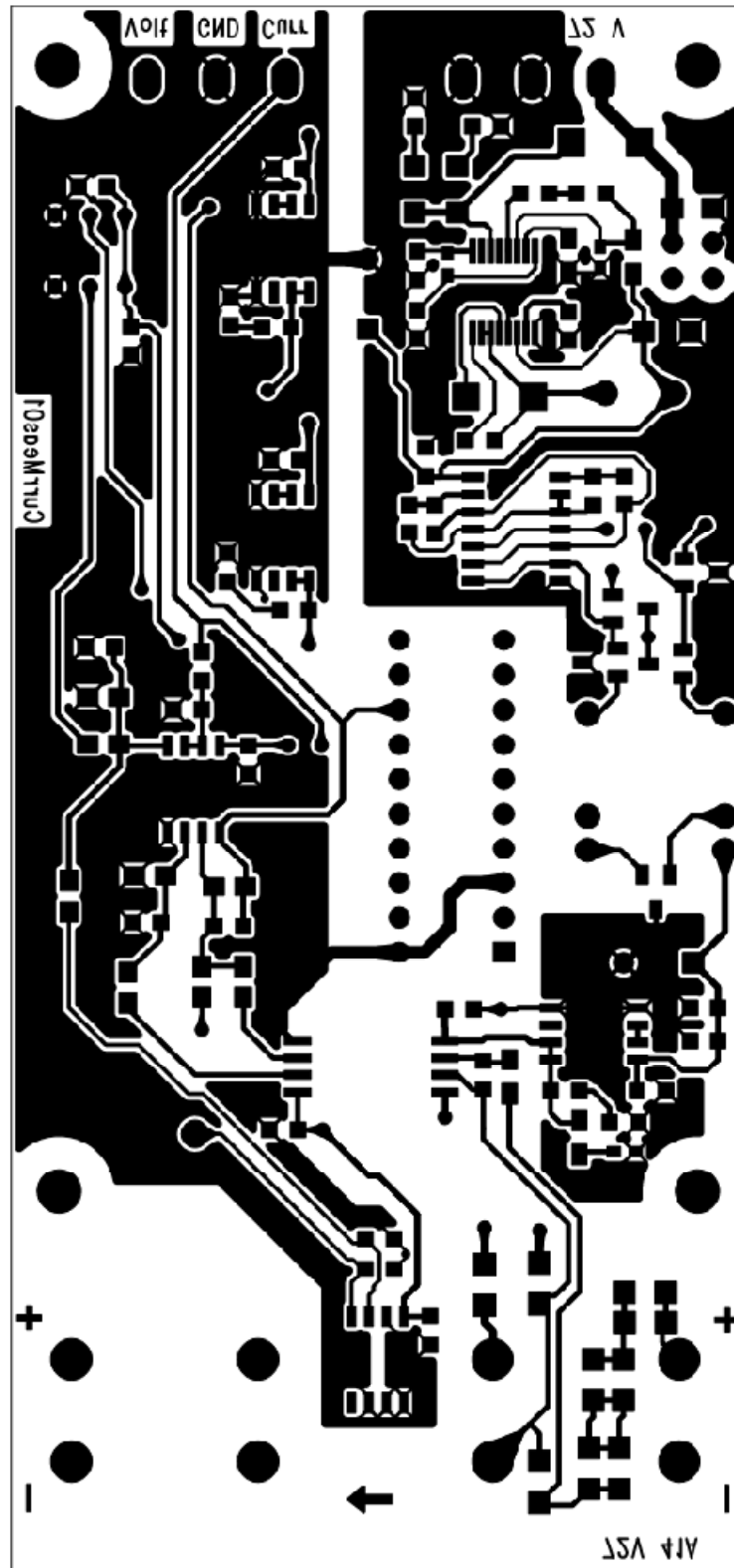
LÄHTEET

- [1] Sedra, A.S. ja Smith, K.C., *Microelectronic Circuits*. New York: Oxford University Press, 1998
- [2] "LM5574/LM5574Q SIMPLE SWITCHER® 75V, 0.5A Step-Down Switching Regulator," National Semiconductor, Santa Clara, California, USA
- [3] "Current Transducer 40-P/SP600," LEM U.S.A., Inc., Milwaukee, Wisconsin, USA
- [4] Coombs, C.F., *Coombs' Printed Circuits Handbook*. New York: McGraw-Hill, 2001
- [5] "Hall Effect Sensing and Application," Honeywell International, Inc., Morristown, New Jersey
- [6] Inkinen, P., Manninen, R. ja Tuohi, J, *Momentti 2 insinöörifysiikka*. Helsinki: Otava, 2002
- [7] "Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifier," Analog Devices, Inc., Norwood, Massachusetts, USA
- [8] "ACPL-C79B, ACPL-C79A, ACPL-C79 Precision Miniature Isolation Amplifiers," Avago Technologies Ltd., San José, California, USA
- [9] [www-dokumentti]. Saatavilla: <http://www.national.com/en/webench/index.html>

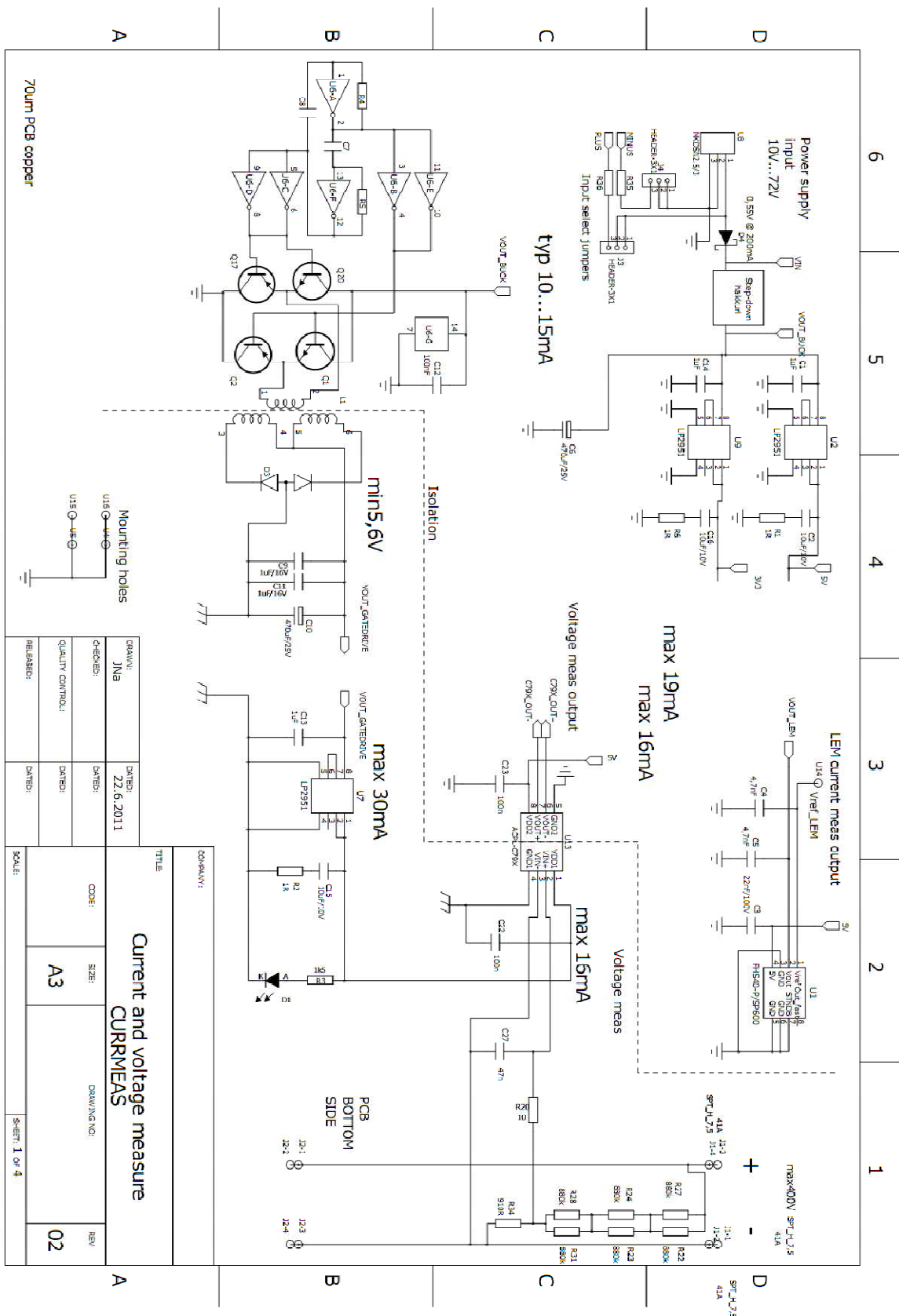
Piirilevyn top-puolen layout



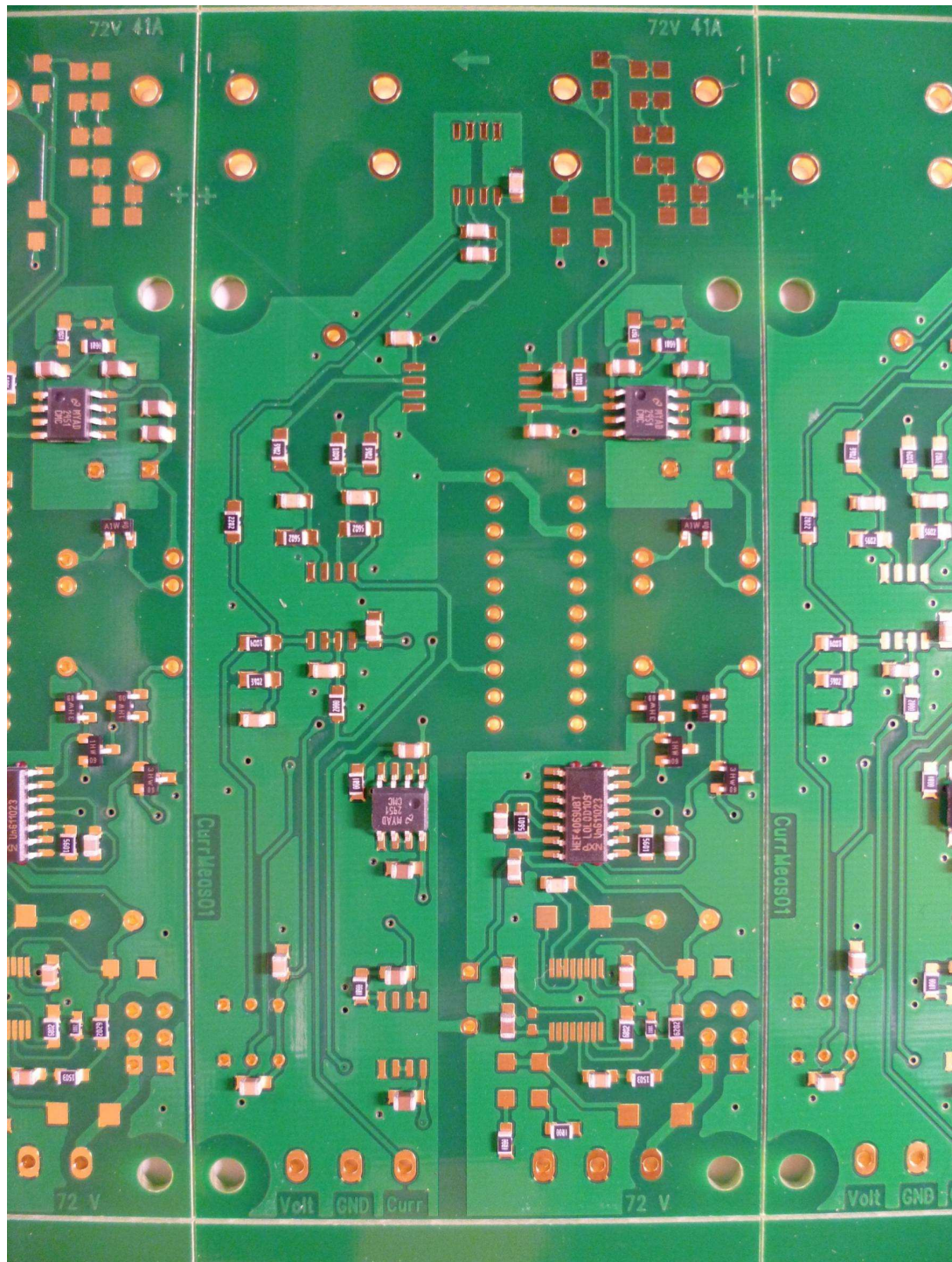
Piirilevyn bottom-puolen layout



Mittauspiirien kytkentäkaavio



Piirilevypaletti koneladonnan jälkeen



Valmis moduuli

